المنظمة العربية للترجمة

جان بيار فردي

تاريخ علم الفلك القديم والكلاسيكي

ترجمة

د. ريما بركة

بدعم من مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية



تاريخ علم الفلك
القديم والكلاسيكي


مركز تحقيقات كامپيوتري علوم اسلامي

المنظمة العربية للترجمة

جان بيار فردي

تاريخ علم الفلك القديم والكلاسيكي

ترجمة

د. ريما بركة

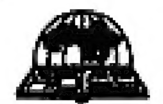
مراجعة

د. سامي اللقيس

بدعم من مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم

الفهرسة أثناء النشر ـ إعداد المنظمة العربية للترجمة
فردي، جان بيار
تاريخ علم الفلك القديم والكلاسيكي/ جان بيار فردي؛ ترجمة ريما بركة؛ مراجعة سامي اللقيس.
222 ص. ـ (أصول المعرفة العلمية)
ببليوغرافيا: ص 207 ـ 209.
يشتمل على فهرس.
ISBN 978-9953-0-1420-3
1. الفلك ـ تاريخ. 2. الفلك الطبيعي. أ. العنوان. ب. بركة، ريما (مترجم). ج. اللقيس، سامي (مراجع). د. السلسلة.
520.9

Verdet, Jean - Pierre
Histoire de l'astronomie ancienne et classique



المنظمة العربية للترجمة
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 5996 ـ 113
الحمراء ـ بيروت 2090 1103 ـ لبنان
هاتف: 753031 ـ 753024 (9611) / فاكس: 753032 (9611)
e-mail: info@aot.org.lb - http://www.aot.org.lb

توزيع: **مركز دراسات الوحدة العربية**
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 6001 ـ 113
الحمراء ـ بيروت 2407 2034 ـ لبنان
تلفون: 750084 ـ 750085 ـ 750086 (9611)
برقياً: «مرعربي» ـ بيروت / فاكس: 750088 (9611)
e-mail: info@caus.org.lb - Web Site: http://www.caus.org.lb

الطبعة الأولى: بيروت، حزيران (يونيو) 2009

المحتويات


مرکز تحقیقات کامپیوتری علوم اسلامی

مقدمة المؤلف للطبعة العربية

يُقال إن علم الفلك يأتي إلى الشعوب من الرعيان فيها، وإن الرعيان الكلدانيين قد اخترعوا هذا العلم لنا من على سهولهم الحارّة ذات السماء الصافية على الدوام. صحيح أن الآثار الأكثر قدماً لدراسة السماء تأتينا من ألواح بابلية، ولكنّ الحقيقة لا بد وأنها كانت أقل رعوية وأكثر تعقيداً. فالرهبان والفلاسفة سرعان ما تدخّلوا في الأمر، وغالباً ما حجبت الرياح الرملية الآتية من الصحارى المجاورة أفق السهول الكلدانية : هذه الظروف مزعجة بالنسبة لعلم الفلك هذا، وهو الذي كان يهتم، في بداياته، بشروق النجوم وغروبها أكثر من اهتمامه بها عند بلوغها كبد السماء.

إن تاريخ علم الفلك هذا لا يعالج موضوع الميثولوجيات المتعلقة بنشأة الكون، فهو موضوع يتعلق بطريقة تفكير أخرى. إنه يبدأ بمرحلة ارتقاء بابل، حوالى العام 1800 قبل عصرنا، وهي مرحلة قدّمت لنا أقدم الألواح التي فيها طابعٌ فلكي واضح. وتُخصَّص فقرة من علم الفلك هذا، الذي جاء قبل علم الفلك اليوناني، لعلم الفلك المصري القديم. صحيح أنّ الحضارة المصرية لم تُول اهتماماً كبيراً للعلوم بشكل عام، ولعلم الفلك بشكل خاص، ولكنّ علماءها الفلكيين تركوا بعض الإرث للأجيال

القادمة، والسنة المصرية تعد من أهم هذا الميراث وأكثره نفعاً.

بعد الفصل المخصَّص لعلم الفلك الرياضي عند اليونان، يُخصَص هذا الكتاب مكاناً كبيراً لما يمكننا أن نسميه بالثورة الكوبرنيكية التي أطلقها نشر كتاب نيكولا كوبرنيكوس (Nicolaus Copernicus) **في الدوران** عام 1543، والتي أتمّها كتاب **المبادئ** (*Principles*) لإسحق نيوتن عام 1687. لقد كانت ثورة نظرية مصحوبة بثورة تقنية، ألا وهي اختراع المنظار الفلكي الذي قلب نظرتنا للعالم.

ويختم هذا التاريخَ الوجيز فصلٌ مخصّصٌ لما اعتدنا أن نطلق عليه اسم «علم الفلك الكلاسيكي»، وهو ثمرة علم الميكانيك السماوي النيوتوني وتطوّر التحليل الرياضي، من بدايات هذا العلم في القرن الثامن عشر وحتى الانتصار الكبير الذي يحصل عليه عند اكتشاف كوكب نبتون بالحساب في العام 1846، في وقت كان فيه علمُ الفيزياء الفلكي يخطو خطاه الأولى.

انطلاقاً من تلك الفترة، لم يعد يُنظر إلى النجوم على أنها نقاط مضيئة يجب تحديد مكانها وحركتها وحسب، بل أصبحت تُعدّ كذلك أجساماً نحاول تحديد خصائصها الفيزيائية الكيميائية، كـ: التكوين، والحرارة، والضغط، والكثافة، والحقل المغنطيسي... إلخ. إن تطورات علم الفيزياء الفلكي الذي يطال مجالات عدة، من الأحجار النيزكية المجهرية إلى المجرات العملاقة وإلى الكون ككل، هذه التطورات تمنعنا من تناول تاريخ هذا العلم، اللهم إلاّ في حال قُمنا باختصاره في سلسلة من النصوص القصيرة جداً التي لا تتمتع بأهمية كبيرة.

بيد أننا سنجد في هذا الكتاب فصلاً مخصصاً لعلم الفلك في

العصور الوسطى الذي غالباً ما أُهمِل، وذلك على الأقل من أجل الاعتراف بفضل علماء الفلك العرب الذين قاموا بأكثر من المحافظة على الرسالة اليونانية، وكذلك بأكثر من نقلها إلى الحضارة الأوروبية. وهذا الفصل يدين كثيراً لأعمال زميلي ريجيس موريلون (Régis Morelon)، وله أوجّه جزيل الشكر.

جان بيار فردي




مرکز تحقیقات کامپیوتری علوم اسلامی

مقدمة المترجمة

إن علم الفلك اليوم من أكثر العلوم ازدهاراً وتشعّباً. فتطوّر الصناعات والتقنيات، وتعدّد الاكتشافات في المجالات النظرية والتطبيقية على حدّ سواء، ساعدا كثيراً في تطوّر علم الفلك وتقدّمه بسرعة كبيرة: إن التلسكوبات العملاقة، ذوات المرايا الواحدة أو المتعددة المرايا، التي توجد على الأرض أو التي تسبح في الفضاء، باتت تسمح لعلماء الفلك بسبر أعماق الكون ودراسة أماكن لم يكن من الممكن رصدها ولا دراستها من قبل، والمسابر الفضائية التي تم إرسالها على المذنبات والكواكب والكويكبات جعلت الفضاء في متناول العلماء، إذ ساعدت على اكتشاف طبيعة هذه الأجرام السماوية وعلى تحليل التراب على سطحها وعلى دراسة أبعادها.

ولكن علم الفلك ليس علماً حديثاً، وإنما هو نتيجة قرون طويلة من الدراسات وعمليات الرصد والمراقبة والحسابات التي واكب تطوُّرها تطوّرَ الدراسات الفلكية، وأدّى إلى الولوج في ما يُسمّى بعصر غزو الفضاء.

علم الفلك في تاريخ البشرية

الواقع أن الإنسان بدأ بالاهتمام بالسماء والأجرام السماوية منذ

فجر التاريخ، عندما رفع رأسه نحو السماء ليتأمل الشمس والقمر والكواكب والنجوم. ولكن علم الفلك لم يكن، حتى في بدايته، نشاطاً تأملياً بحتاً ودون فائدة عملية. فقد اهتم الإنسان برصد ظهور الأجرام السماوية ومكان وجودها وحركاتها لأمورٍ بسيطة تخصّ حياته اليومية: إذْ كانت الشعوب المسافرة، وعلى الأخص البحارة والقوافل. تهتدي سبيلها بواسطة الأجرام السماوية، سواء على البر أو في البحر، فعلى سبيل المثال، يُعتقد أن الفينيقيين هم الذين أشاروا إلى كوكبة الدب الأكبر ثم إلى كوكبة الدب الأصغر لأنهما تدلان على شمال البحّارة.

كذلك، استطاع الإنسان أن يربط بين حركات الكواكب والظواهر السماوية من جهة، والفصول من جهة أخرى. إن المصريين القدامى، مثلاً، لاحظوا أن فيضان النيل السنوي يتوافق مع البزوغ الشمسي للنجم سوثيس. وقد وضعوا تقويماً زراعياً يبدأ مع أول ظهور في الشرق لهذا النجم، مباشرة قبل شروق الشمس. يقول أرنست لوبون:

«كان البشر الأوائل يحتاجون، من أجل أعمالهم الزراعية، إلى التمييز بين الفصول وإلى تحديد أوقات عودة كل فصلٍ منها؛ ولم يلبثوا أن لاحظوا أن انتظام حركات الأجرام السماوية يسمح بتلبية هاتين الحاجتين: وهذا الأمر جعلهم يدوّنون أرصادهم للظواهر السماوية ويحاولون إيجاد أسبابها. وهكذا تشكّل، في بداية حياة كل شعب من الشعوب، العلمُ الذي يطلق عليه اسم علم الفلك»[1].

(1) Ernest Lebon, *Histoire abrégée de l'astronomie* (Paris: Gauthier-Villars, 1899), p. 14.

والمصريون القدامى ليسوا الشعب الوحيد الذي ارتكز على جرم سماوي لوضع تقويمه، إذ نجد أن البابليين واليونانيين والرومان وغيرهم من الشعوب قد وضعوا تقويمهم بناءً على رصدهم لحركة الشمس أو القمر أو نجم ما، وأرّخوا بالنتيجة أحداث وجودهم وفقاً له. فالكهنة الفلكيون الأزتيك كانوا يضعون تقويمهم بناءً على مراقبة نجم الدبران في كوكبة الثور، وبنى البابليون تقويمهم على أوجه القمر فقاموا بدراسة حركات الشمس والقمر، وتوصّلوا تقريباً إلى توقّع خسوفات القمر وكسوفات النجوم.

ويتفق المؤرّخون على أن البابليين قد اهتموا بالأرصاد الفلكية أكثر من أي شعب آخر في التاريخ القديم. وقد حققوا منجزات فلكية تفوق في جِدّتها وفي أهميتها ما حققه العديد من الشعوب القديمة، بمن فيهم المصريون القدامى والصينيون، فهم الذين حسّنوا رصد الشمس والقمر، وراقبوا سرعة حركتهما في دائرة الفلك، وحدّدوا تاريخ ظهور اليوم الجديد للقمر، كما أنهم استعملوا طرقاً جديدة لحساب حركة الكواكب ومسارها[2].

ليس ذلك فحسب، بل إن الشعوب القديمة ربطت بين حركات النجوم والكواكب ومواقعها في الأبراج السماوية وبين مستقبل كل فرد ومصيره، فاستعملت معارفها في هذا المجال للتكهّن بالطالع والتنجيم والتنبؤ بالأحداث القادمة. ومهما ابتعدت المسافة التي تفصل بين هذه النظرة إلى الكواكب والمنهجية العلمية، أو اقتربت، فإن ما هو ثابت وأكيد هو أن اهتمام الإنسان القديم (والإنسان المعاصر كذلك، ولكن بدرجة أقلّ) بعلم الفلك قد ساهم كثيراً في تطوير علم الفلك الرصدي، إذ إن علم التنجيم قد عُنِيَ بدراسة الظواهر الفلكية

---

(2) أنطوان بطرس، **العصور العربية لعلم الفلك، ما قبل وما بعد** (بيروت: مكتبة لبنان ناشرون؛ القاهرة: الشركة المصرية العالمية للنشر - لونجمان، 2003)، ص 50.

ورصد حركات الكواكب ودورانها ومواقعها من أجل ربطها بأحداث حياة الإنسان وقدره.

وازداد الاهتمام بعلم الفلك في الحضارة الإسلامية، إذ إن ممارسة الدين الإسلامي يتطلب معرفة دقيقة لمواقيت الصلاة وبداية شهر رمضان ونهايته واتجاه الكعبة للصلاة، وغيرها. ويجدر القول إن اهتمام العرب بعلم الفلك قد بدأ منذ القدم، وذلك لوجودهم في الصحراء، حيث لا يوجد أي معالم ليهتدوا بها سوى النجوم في السماء. ثم جاء الإسلام ليزيد من أهمية هذا العلم عند العرب، فأضاف الدوافع الدينية إلى الدوافع الحياتية المباشرة.

هذه العلاقة التي ربطت علم الفلك القديم بحاجات الشعوب اليومية جعلت هذا العلم ينشط ويتطور بسرعة، إذ انكبّ علماء الفلك على رصد النجوم والكواكب ومراقبة حركاتها ودراستها، فبرز العديد من بينهم عبر التاريخ، كعالمي الفلك اليونانيين هيبارخوس (~190 ـ 120 ق.م) وبطليموس (~100 ـ 170)، ووُضعت العديد من النظريات لتفسير حركات الأجرام السماوية وتطوّرت (انظر الجدول ص 26).

علم الفلك في الحضارة العربية

عرفت الحضارة العربية عدداً كبيراً من علماء الفلك الذين برزوا من خلال اكتشافاتهم ومؤلفاتهم، ومن أشهرهم:

الخوارزمي (~783 ـ 850م): وضع زيجين فلكيين عرفا باسم **زيج السندهند**، وكان لهما أثر كبير في الأزياج التي وضعها العلماء العرب من بعده، إذ استعانوا بهما واعتمدوا عليهما. كما برع الخوارزمي باستعمال الأسطرلاب، فكتب عنه وشرح كيفية استعماله.

الفرغاني (~805 ـ 880م): قام بحساب خطوط الطول الأرضية، وحدد قطر الأرض وأقطار الكواكب الأخرى مقارنة مع قطر الأرض.

عيّنه المأمون رئيساً لمرصد الشماسية في بغداد، وهذا المرصد يُعدّ الأول في الإسلام.

ثابت بن قرة الحراني (826 ـ 901م): قام بدراسة السرعات الظاهرة للنجوم وحساب ميل دائرة البروج. كما قام بحساب دقيق لطول السنة الشمسية، ولم يخطئ بالنسبة للقيمة الحالية سوى بثانيتين فقط.

البتاني (~825 ـ 929م): وضع أسس ونظريات علم الجبر وعلم حساب المثلثات، واستعملها لتصحيح حسابات بطليموس، وقام بتصحيح قيمة الاعتدالين الصيفي والشتوي التي حددها بطليموس، ورصد التغيرات في القطر الظاهري للشمس واستنتج منها احتمال حدوث كسوف حلقي للشمس.

عبد الرحمن الصوفي (903 ـ 986م): يُعتبر أول من قال بكروية الأرض. وقد قام برصد النجوم وحدّد أبعادها طولاً وعرضاً في السماء، واكتشف نجوماً ثابتة جديدة أدرجها في مؤلفه **كتاب الكواكب الثابتة** الذي يتضمن وصفاً للنجوم ومواقعها وقدرها ولونها، بالإضافة إلى أول وصف ورسم لما سمّاه «السحابة الصغيرة» والذي هو في الواقع مجرة المرأة المسلسلة (Andromède).

أبو الوفاء البوزجاني (939 ـ 998م): لاحظ الاختلاف الثالث في حركة القمر (الاختلافان الأولان هما المعادلة المركزية والاختلاف الدوري) الذي عُزي فيما بعد إلى تيكو براهي.

ابن يونس (~950 ـ 1009م): بنى له الخليفة الفاطمي الحاكم بأمر الله مرصداً على جبل المقطّم قرب القاهرة وجهّزه بأفضل أدوات الرصد. وقد رصد ابن يونس كسوفين للشمس وسجّلهما بدقة متناهية. كما وضع زيجاً سماه **الزيج الحاكمي**، تيمّناً بالخليفة الحاكم بأمر الله، وهو زيج تجاوز بدقته كل الأزياج التي كانت قد وُضعت قبله.

ابن الهيثم (965 ـ 1039م): وضع نظرية عن حركات الكواكب، واكتشف أن كل الأجرام السماوية، بما فيها النجوم الثابتة، ترسل أشعتها الخاصة، ما عدا القمر الذي يأخذ نوره من الشمس. كما اكتشف أن الغسق هو ظاهرة يسببها انكسار أشعة الشمس على غلاف الأرض الجوي.

البيروني (973 ـ 1048م): قام بحساب شعاع الأرض بدقة، وطوّر علم الفلك الكروي باستعماله علم المثلثات وإحداثيات كروية. كما قال البيروني بدوران الأرض حول محورها، وافترض أن الأرض ربما تدور حول الشمس، وأنكر أنها مسطحة.

نصير الدين الطوسي (1201 ـ 1274م): قام هولاكو خان ببناء مرصد له في مراغة، وهذا المرصد كان يعد أكبر مركز أبحاث في عصره. وقد وضع الطوسي جداول في غاية الدقة لحركات الكواكب واقترح نظاماً جديداً للكون أبسط من نظام بطليموس.

الواقع أن أثر هؤلاء العلماء العرب في تاريخ علم الفلك كان كبيراً جداً، ليس لأنهم استوعبوا في لغتهم الأم كلّ ما جاء به العلماء والفلاسفة في هذا المجال من قبلهم، ونقدوا مضامين كتبهم، وطوّروا نظرياتهم وحسب، بل وخصوصاً لأن مؤلفاتهم التي وضعوها على مدى عدة قرون قد تُرجمت إلى اللاتينية، لغة العلم في أوروبا القرون الوسطى وعصر النهضة، ودُرِّست في جامعاتها، واعتُمدت قاعدةً انطلق منها العديد من العلماء الأوروبيين لتأسيس طرق رصد الأفلاك في عصرهم ومن أجل وضع نظرياتهم[3].

لقد بدأ العرب بدراسة الفلك وحركات الكواكب على الأسس

---

(3) انظر بشكل خاص الفصل السادس من كتاب: Juan Vernet, *Ce que la culture doit aux arabes d'Espagne*, traduit de l'espagnol par Gabriel Martinez Gros (Paris: Sindbad, 1985).

والنظريات التي كانت الشعوب السابقة قد وضعتها، واعتمدوا خاصةً على كتاب **المجسطي** لـ بطليموس، الذي ترجموه إلى اللغة العربية. ولكن الأرصاد المكثفة التي قاموا بها ومعرفتهم المتقدمة بعلم الرياضيات وبراعتهم في هذا العلم سمحت لهم بالشك بالنتائج التي توصل إليها بطليموس وغيره من علماء الفلك، فانتقدوها ونقّحوها وصحّحوا مضامينها، حتى إنّ ابن الهيثم قام بإبانة كل الأخطاء الموجودة في **المجسطي** وقام بتصحيحها في كتابه **الشكوك على بطليموس**.

وخير دليل على الموقف الناقد والمجدِّد الذي اتخذه العرب في مجال علم الفلك، ما نجده عند مؤيد الدين العرضي في مجال علم الهيئة . فقد اعترض على بطليموس بقوله إن المنهج العلمي الصحيح يكمن في أن تتناسب الهيئة الرياضية في الوقت نفسه مع الأرصاد الدقيقة التي يحسبها الفلكي وبين الأصول الطبيعية المسلّم بها، إذ إنه يقول إن الهيئة الصحيحة هي «إصابة ما يخرج بالأرصاد ويُشاهَد بالعيان ويجري على الأصول الموضوعة من غير مخالفة لشيء منها»[4].

وتجدر الإشارة إلى أن منظمة الأونسكو والاتحاد الفلكي الدولي قد أعلنا سنة 2009 السنة الدولية لعلم الفلك، وذلك لتزامنها مع ذكرى مرور 400 عام على استخدام غاليليه أول منظار فلكي لرصد الأجرام السماوية. وقد قام غاليليه في العام 1609 بتوجيه منظاره نحو الفضاء، فاكتشف عدداً كبيراً من النجوم التي لم تكن مرئية بالعين المجردة، وتعرّف إلى ما في القمر من تضاريس وجبال ووديان، كما اكتشف أقمار كوكب المشتري والبقع الشمسية. وهذه

---

(4) مؤيد الدين العرضي، كتاب الهيئة، مخطوط «مكتبة مدبولي»، أكسفورد، آذار/مارس (621)، مذكور في: مؤيد الدين بن بريك العرضي، **تاريخ علم الفلك العربي: كتاب الهيئة**، تحقيق جورج صليبا (بيروت: مركز دراسات الوحدة العربية، 2001).

الاكتشافات غيّرت نظرة الإنسان للكون وفتحت أبواباً جديدة في علم الفلك لم يكن قد تم اكتشافها من قبل (انظر الفصل الرابع من الكتاب)[5].

علم الفلك والعلوم الأخرى

لم يعتمد علم الفلك في مراحل تطوره على الرصد فقط، فقد اتصل وارتبط، خلال تطوره وتوسّعه، بالعديد من العلوم، منها علوم مساعدة، كالرياضيات والبصريات، التي استعان علم الفلك بمبادئها ونظرياتها، ومنها علوم أسفرت بارتباطها مع علم الفلك عن نشأة علوم جديدة ضمن إطار علوم الفضاء، كالفيزياء الفلكية التي نتجت عن الفيزياء، والكيمياء الفلكية التي نتجت عن الكيمياء، والطب الفلكي، وعلم الآثار الفلكي، وغيرها من العلوم.

وهكذا ساهمت علوم عدة، ومازالت تساهم، بشكل مباشر أو غير مباشر، في رصد الأجرام السماوية ودراستها، إذ إن رصد الكواكب والنجوم يتم بواسطة آلات علم البصريات، ويتم حساب مدارها وقياسه، وحساب المسافة التي تفصل بين الأجرام السماوية وقياس سرعة دورانها بناءً على نظريات رياضية وفيزيائية، كما يتم تحليل تركيبتها بواسطة تقنيات فيزيائية وكيميائية. وتعتمد صناعة المركبات الفضائية التي تساعد على سبر أعماق الفضاء على نظريات فيزيائية وعلى تقنيات مختلفة، كالإلكترونيك وعلم الاتصالات والهندسة الميكانيكية والمعلوماتية. . . وغيرها.

---

(5) صرّحت رئيسة الاتحاد الدولي لعلم الفلك «كاترين سيزارسكي» أن «علم الفلك من أقدم العلوم الأساسية، وهو ما زال له تأثير عميق في ثقافتنا ويعدّ تعبيراً قوياً للعقل البشري». ويهدف إعلان سنة 2009 السنة الدولية لعلم الفلك إلى تحفيز الناس، ولا سيما الشباب، على الاهتمام بهذا العلم تحت عنوان «الكون، اكتشفوا ألغازه».

علم الفلك والرياضيات: ارتبط علم الفلك بالرياضيات منذ الحضارة البابلية والإغريقية، فواكب تطوره ـ في المبادئ والنظريات كما في الرصد وحساب الأبعاد والمسافات ـ تطورَ هذا العلم، خاصة عندما ظهرت الاكتشافات الثورية في علم الحساب والهندسة وعلم المثلثات وغيرها. وكانت الرياضيات تُستعمل في تحديد حجم الأجرام السماوية وحركاتها ومداراتها ودوراتها، كما أنها كانت تساهم في وضع التقاويم وفي تحديد مدّة السنة.

لقد كان البابليون يعتمدون في تقسيمهم السنة إلى 360 يوماً على النظام الستوني، وهو نظام لا يزال يُستعمل حتى اليوم في تقسيم الساعة إلى ستين دقيقة والدقيقة إلى ستين ثانية. وفي نحو العام 370 ق.م. وضع أودوكس نظاماً هندسياً لشرح حركات الكواكب، هو نظرية مركزية الأرض، وفي القرن الثاني الميلادي استخدم بطليموس، في كتابه **المجسطي**، عمليات هندسية وحسابية لعرض الظواهر الفلكية التي رصدها ولوصف الحركات الظاهرة للكواكب والنجوم (انظر الفصل الثاني من الكتاب).

وتجدر الإشارة في هذا الإطار إلى أن أغلبية علماء الفلك العرب كانوا كذلك علماء رياضيات، وهم ساهموا بذلك في تطوير علم الفلك والرياضيات على حدّ سواء. ويكفي ذكر الخوارزمي مؤسّس علم الجبر والبتّاني واضع قانون جيب التّمام في حساب المثلثات الكروية كمثال على ذلك. من ناحية أخرى، يظهر ارتباط علم الفلك بالرياضيات في **كتاب الشفاء** لابن سينا، حيث إنه يتناول علم الفلك في القسم الرابع من الجزء المخصّص للرياضيات.

وأخيراً، ساهم علم الرياضيات، وبالتحديد علم الحساب، في التثبت من صحة النتائج التي تم التوصّل إليها عبر الرصد، وفي اكتشاف موقع نبتون، الكوكب الثامن في نظامنا الشمسي.

علم الفلك والفيزياء: ظلَّ علم الفلك متّسماً بطابع رياضيّ حتى مرحلة متقدمة من تاريخه، ولكنه كان في الوقت عينه يعتمد على علم آخر في تطوره، هو علم الفيزياء، الذي سيأخذ شيئاً فشيئاً أهمية كبيرة خاصة في تطور النظريات الفلكية.

لقد ساهمت الفيزياء في فهم طبيعة الأجرام السماوية، والنجوم على وجه الخصوص، وفي دراسة الفضاء المحيط بالنجوم والمواد التي تكوّنه، كما ساهمت في اكتشاف تركيبة الكون وفهم الأسباب التي تكمن وراء الظواهر السماوية والفلكية، كالكسوف والخسوف وتلألؤ النجوم ودوران الأرض وسائر الأجرام السماوية، وهي ساهمت بالتالي في التوصل إلى اكتشاف تركيبة النجوم النووية ودورة حياة النجوم والجاذبية الكونية وقانون النسبية، ونظريات واكتشافات أخرى أثّرت في تطوّر علم الفلك.

وهناك فرع من علم الفيزياء ساهم في تطور علم الفلك بشكلٍ ملحوظ وخاصة علم الفلك الرصدي، هو علم البصريات. فآلات الرصد الفلكية، كالمنظار الفلكي والتلسكوبات على أنواعها، ليست سوى اقتباس من علم البصريات. كما ساعدت البصريات على فهم بعض الظواهر الجوية، كالهالة حول الشمس أو القمر التي يسببها انكسار الضوء على بلورات الجليد الموجودة في الجو.

علم الفلك والتقنيات الحديثة: شهد علم الفلك تطوراً ملحوظاً وسريعاً مع بداية القرن العشرين، وذلك بفضل التطور التكنولوجي الذي ساهم في بناء المركبات الفضائية والتلسكوبات الفضائية والأقمار الصناعية، مما أتاح للإنسان سَبْرَ أعماق الفضاء وتحقيق اكتشافات جديدة.

لقد ساهم اكتشاف الأشعة ما تحت الحمراء والأشعة السينية

وأشعة غاما والموجات الراديوية في زيادة معلومات الفلكيين عن تركيب الكون وتاريخه وتطوره. وتم تصميم تلسكوبات راديوية وأخرى لرصد الأشعة ما دون الحمراء أو الأشعة السينية أو أشعة غاما، وكلُّها أدّت إلى اكتشافات فلكية جديدة كالكوازار والبلازار والثقوب السوداء والنجوم النيوترونية والأشعة الكونية التي تصدر من هذه الأجسام.

ولا ننسى أن علم الفلك يرتبط في أيامنا هذه بعلم الحاسوب، الذي أصبح جزءاً مهماً من علم الفلك الحديث. فأجهزة الحاسوب تساعد على توجيه التلسكوبات الضخمة الأرضية أو الفضائية وعلى ضبط مراياها، وعلى التحكم بعمليات قياس الإشعاعات التي تجمعها التلسكوبات وعلى تحليل الأرصاد، كما أنها تستخدم في علم الفلك النظري.

لقد مرّ تطوّر علم الفلك إذاً بمراحل متعددة. ويمكننا أن نقسمها زمنياً وبشكل إجمالي إلى الأقسام الآتية:

علم الفلك الرصدي، الذي يمتد من بداية علم الفلك وحتى بداية القرن الثاني، وهو علم يرتكز بمجمله على الرصد.

علم الفلك الرياضي، الذي يمتد حتى أواسط القرن الخامس عشر.

علم الفلك الفيزيائي، الذي يبدأ مع ثورة كوبرنيكوس، والذي يحمل في طياته تغيرات واكتشافات كثيرة، وهو يُعتبر بداية علم الفلك الحديث ويشهد تطوراً ملحوظاً في نظريات علم الفلك وظهور تفرعات جديدة داخل علم الفلك.

علوم الفضاء، التي بدأت مع إرسال أول مركبة إلى الفضاء وتسارع الاكتشافات، وهي مرحلة ما زالت مستمرة حتى اليوم.

❋ ❋ ❋

هنا تظهر أهمية هذا الكتاب الذي نحن بصدده والذي يقوم بدراسة معظم مراحل علم الفلك منذ بداياته في العصور القديمة وحتى استتباب نظرياته في العصر الكلاسيكي مع اكتشاف آخر كوكب في نظامنا الشمسي، نبتون. وهو ينقسم إلى ستة فصول، هي:

الفصل الأول: يتناول الفصل الأول علم الفلك عند البابليين والمصريين القدامى، أسس التقاويم التي وضعوها والمشاكل التي واجهوها.

الفصل الثاني: يتناول الفصل الثاني علم الفلك عند اليونان، ونظريات حركة الكواكب وتطورها، من أبولونيوس الذي ابتكر نظام الكرات المشتركة المركز، إلى هيبارخوس واكتشاف مبادرة الاعتدالين، وبطليموس وكتابه **المجسطي** وتطويره لنظرية حركة الكواكب.

الفصل الثالث: يُعنى الفصل الثالث بعلم الفلك عند العرب، فيبدأ عند ترجمة **زيج السندهند** إلى اللغة العربية وتأثيره على علم الفلك العربي، ويستعرض أعمال أهم علماء الفلك العرب ومؤلفاتهم واكتشافاتهم ومساهماتهم في تطور علم الفلك ونظرياته، والتصحيحات التي أدخلوها على علم الفلك اليوناني الذي ورثوه، وتأثيرهم بعلم الفلك في أوروبا.

الفصل الرابع: يتوقف الفصل الرابع عند الثورة الكوبرنيكية ونقد نظرية مركزية الأرض واستبدالها بنظرية مركزية الشمس، وعند قوانين كبلر الثلاثة لحركات الكواكب، وعند غاليليه ومنظاره الفلكي ورصده لأقمار المشتري، وعند أعمال تيكو براهي.

الفصل الخامس: يتناول الفصل الخامس عالم الفلك إسحق نيوتن وكتابه **المبادئ** واكتشافه لقانون الجاذبية الكونية وأثر هذا القانون على علم الفلك ونظرياته.

الفصل السادس: يتناول الفصل السادس أعمال عدد من علماء

الفلك في القرن الثامن عشر واكتشافاتهم، كأويلر وتأسيسه لعلم الميكانيك التحليلي، وموبرتوي ومبدأ كمية الفعل الأقل، ثم يتناول بعض المسائل التي صعب حلها في ذلك العصر، كنظرية حركة القمر، وينتهي باكتشاف لو فيرييه لكوكب نبتون وانتصار علم الميكانيك السماوي.

نلاحظ من خلال هذا العرض السريع لوجهة نظر المؤلف أنه يتناول هذا الموضوع بطريقة شمولية ترتكز على ثلاثة أسس للتحليل الفلكي، وهي العلماء الراصدون، والتقنيات المستعملة، والعنصر الثالث الذي يُعد في أساس هذا الكتاب، الذي هو النظريات الفلكية وتقدمها وتطورها عبر العصور. إن الكاتب يعرض تاريخ علم الفلك من خلال استعراض حياة علماء الفلك الأكثر بروزاً ـ من ميتون وأبولونيوس وبطليموس عند اليونان، إلى لاغرانج ولابلاس وهيرشل في القرن الثامن عشر، مروراً بأهم علماء الفلك العرب كثابت بن قرة والبتاني وابن الشاطر، وعلماء الثورة الفلكية الأوروبية، ككوبرنيكوس وكبلر وغاليليه وتيكو براهي ونيوتن، ـ وكذلك من خلال استعراض أعمالهم والتقنيات التي استعملوها في رصدهم للأجرام السماوية وفي وضعهم للنظريات الفلكية، وهو بالتالي يستعرض تطور بعض النظريات الفلكية وتقدمها، لا سيما تلك التي تتعلق بحركات الكواكب والأجرام السماوية.

ولا بد هنا من التنويه بأنه على الرغم من أن المؤلف يخصص فصلاً كاملاً لعلم الفلك عند العرب، إلا أنه بنظرنا لا يفي الحضارة العربية الإسلامية كل حقها في هذا المجال، لا من حيث الفترة الزمنية التي تبوّأ خلالها المسلمون الصدارة في هذا العلم ـ وهي فترة تمتد في التقويم الميلادي من القرن الثامن وحتى ما بعد منتصف القرن الخامس عشر، ولا من حيث إسهاماتهم العلمية في مجال تطوير النظريات ودراسة تركيبة النظام الفلكي.

ولكي نمهد الطريق أمام القارىء العربي لفهم مضامين هذا الكتاب، نعرض في الجدول الآتي أهم الأعمال والاكتشافات في علم الفلك منذ أيام البابليين وحتى منتصف القرن التاسع عشر واكتشاف كوكب نبتون، بحيث يشمل الفترة الزمنية نفسها التي يتناولها الكتاب.

القرن الثامن ق.م.	وضع البابليون النظام الستوني وقسّموا السنة إلى 360 يوماً.
550 ق.م.	اقترح فيثاغورس أن الأرض كروية الشكل.
500 ق.م.	أكّد برمنيدس أن الأرض كروية الشكل وأن القمر يستنبط نوره من الشمس.
400 ق.م.	وضع أودوكس نظرية الكرات المشتركة المركز لتفسير حركات الكواكب ووضع الأرض في مركز الكون.
350 ق.م.	اقترح هيرقليدس نظرية دوران الأرض على نفسها.
280 ق.م.	حاول أريسطرخوس تقدير شعاع الشمس وشعاع القمر ومسافة كل من هذين الجرمين إلى الأرض.
250 ق.م.	قام إراتوستينس بأول قياس لشعاع الأرض.
130 ق.م.	حدد هيبارخوس موقع 1000 نجم ووضع جدول نجوم قسّم فيها النجوم إلى ستة أقسام وفقاً لدرجة لمعانها. كما اكتشف مبادرة الاعتدالين وحدد المسافة التي تفصل بين الأرض والقمر وفسّر ظاهرة الكسوف.
150 م.	وضع بطليموس كتابه المجسطي، كما وضع النظام الأرضي المركز للكون الذي يفترض أن الأرض ثابتة في مركز الكون. وظل هذا النظام سائداً حتى القرن السادس عشر.

777م	قام محمد الفزاري ويعقوب بن طارق بترجمة نص فلكي هندي إلى العربية تحت عنوان **زيج السندهند.**
~820م	وضع الخوارزمي جداول فلكية كان لها أثر كبير على الجداول الأخرى التي وضعها العرب في ما بعد.
829م	بنى الخليفة العباسي المأمون في بغداد أول مرصد فلكي دائم في العالم.
~870م	قام ثابت بن قرة الحراني بدراسة السرعات الظاهرة للنجوم وحساب ميل دائرة البروج. كما قام بحساب دقيق لطول السنة الشمسية ولم يخطئ بالنسبة للقيمة الحالية سوى بثانيتين فقط.
900م	أسس البتاني علم الجبر وعلم حساب المثلثات، واكتشف قانون المثلثات الكروية وهو من القوانين الأساسية في علم الفلك الموضعي. كما قام بتصحيح نتائج بطليموس، كقيمة الاعتدالين الصيفي والشتوي.
964م	وضع عبد الرحمن الصوفي كتاب **الكواكب الثابتة** الذي يذكر فيه مجرة المرأة المسلسلة وسحابة ماجيلان الكبرى.
990م	قام البيروني بحساب شعاع الأرض بدقة، وظلت القيمة التي توصّل إليها مستخدمة في أوروبا حتى القرن السادس عشر. كما قال بدوران الأرض حول محورها وافترض أن الأرض ربما تدور حول الشمس وأنكر أنها مسطحة.
1020م	وضع ابن الهيثم نظرية عن حركات الكواكب، واكتشف أن كل الأجرام السماوية، بما فيها النجوم الثابتة، ترسل أشعتها الخاصة، ما عدا القمر الذي يأخذ نوره من الشمس. كما اكتشف أن الغسق هو ظاهرة يسببها انكسار أشعة الشمس على غلاف الأرض الجوي.

1250م	اقترح نصير الدين الطوسي نظاماً جديداً للكون أبسط من نظام بطليموس.
1400م	قام أولغ بيغ ببناء مرصد سمرقند ووضع جداول شمسية حدد فيها موقع ما يقارب ألف نجم.
1506م	نقد كوبرنيكوس نظرية مركزية الأرض وقال بمركزية الشمس.
1600م	وضع تيكو براهي نظاماً للكون يجمع بين نظام بطليموس ونظام كوبرنيكوس وهو نظام تدور فيه الشمس حول الأرض في حين أن الكواكب الأخرى تدور حول الشمس.
1603م	نشر جوهان باير كتابه *Uranometria* وهو أول جدول نجمي يغطي كافة أرجاء القبة السماوية.
1609م	اخترع غاليليه أول منظار فلكي. وضع «يوهان كيلر» أول قانونين من قوانينه الثلاثة التي تتعلق بحركات الكواكب.
1610م	اكتشف غاليليه أقمار المشتري الأربعة الأولى وحلقات زحل وأوجه الزهرة.
1619م	نشر كبلر قانونه الثالث في كتابه **تناسق الكون**.
1668م	اخترع إسحق نيوتن التلسكوب.
1687م	نشر نيوتن قانون الجاذبية الكونية في كتابه **المبادئ الرياضية للفلسفة الطبيعية**.
1781م	اكتشف وليام هيرشل كوكب أورانوس وقام بأبحاث حول السدم والنجوم الثنائية.
1846م	قام لو فيرييه بحساب موقع نبتون الذي قام برصده عالم الفلك غال بعد شهر تقريباً. وقام جون كاوتش آدمز بحسابات أوصلته إلى النتيجة نفسها التي توصل إليها لو فيرييه.

نلاحظ من خلال هذا الجدول أن علم الفلك العربي ـ من خلال الأرصاد التي قام بها العرب، كما من خلال القواعد والأسس الفلكية التي وضعوها ـ قد مهد لنهضة علم الفلك في أوروبا في عهد كبلر وكوبرنيكوس ونيوتن. وهذا يعني أن العرب يشكلون حلقة الوصل بين علم الفلك القديم وأعمال بطليموس واليونانيين من جهة، وعلم الفلك الحديث وعصر النهضة الأوروبية من جهة أخرى. وقد ساهم العرب بذلك في المحافظة على الإرث الفلكي الذي تركه اليونانيون وقاموا بتصحيحات وإضافات واكتشافات أعطت علم الفلك الحديث أسساً ثابتةً لينطلق منها.

ولقد أثبتت الدراسات التاريخية الحديثة لعلم الفلك القديم أن الطريقة التي اعتمدها الفلكيون العرب في إعادة صياغة ما جاء به بطليموس في هذا المجال على أسس رياضية جديدة قد أحدثت تغيّراً هائلاً في هذا العلم لدرجة أن آثارها ظهرت جلية في النظرية الكوبرنيكية. وخير دليل على ذلك ما يقوله جورج صليبا في مقدمة تحقيقه لكتاب علم الهيئة للعرضي: «الكتاب الذي نقوم بتحقيقه الآن هو أحد الأعمال الفلكية العربية التي نرى فيها التطابق التام بين ما توصّل إليه مؤيد الدين العرضي في هيئة الأفلاك العليا وبين ما اقترحه كوبرنيكوس لهيئة هذه الأفلاك عينها بعد قرون ثلاثة»[6].

علم الفلك وتطور مصطلحاته

أخيراً، إذا كان علم الفلك ـ كما قلنا ـ قد ظهر مع ظهور الحضارات البشرية الأولى، وإذا كان قد تطوّر وتغيّر ـ ولا يزال ـ من جيلٍ إلى آخر ومن ثقافة إلى أخرى، فإنه من الطبيعي أن تتعدّد

---

(6) مؤيد الدين العرضي، **كتاب الهيئة**، مخطوط «مكتبة مدبولي»، أكسفورد، آذار/ مارس (621)، مذكور في: العرضي، **تاريخ علم الفلك العربي: كتاب الهيئة**، ص 12.

المصطلحات بتعدُّد وجهات النظر، وتتغيّر بتغيّر الثقافات التي احتضنته. وقد رأينا أن نظريات حركات الكواكب والأجرام السماوية قد تطورت مع تطور علم الفلك على مر العصور، فبعض النظريات تغيّرت مع تطور المعلومات حول الأجرام السماوية والفضاء ثم تلاشت، وظهرت نظريات أخرى جديدة لتحل مكانها، ثم تطورت وتغيّرت بدورها، ومنها ما ثبتت صحته ومنها ما بطُل واختفى. ولكل نظرية مصطلحاتها الخاصة كما لكل شعب أو ثقافة مصطلحاته الخاصة، فاختلفت المصطلحات على مر العصور وتنوّعت، ومنها ما اختفى وبطُل استعماله مع تلاشي إحدى النظريات أو مع مرور الزمن، ومنها ما تغيّر معناه أو استُبدل بمصطلحات جديدة.

وهنا تكمن الصعوبة في ترجمة هذا الكتاب، إذ إنه، كما ذكرنا، يروي تاريخ علم الفلك منذ بدايته وحتى القرن التاسع عشر، أي أنه يشمل مصطلحات من مختلف العصور والثقافات ومن مختلف المدارس والنظريات. ولا نخفي أننا واجهنا بعض الصعوبات في ترجمة هذا الكتاب، وقد كانت بمعظمها تتعلق بالتسميات والمصطلحات. صحيح أننا اعتمدنا بشكل منهجي للتغلب على هذه الصعوبات على المعاجم المصطلحية والموسوعات وعلى المصنّفات العلمية المتخصصة في المجالات والموضوعات المطروقة، إلا أننا ندين كذلك في عملنا هذا إلى باحثين ومتخصصين لم يبخلوا البتة في مدّ يد العون والمساعدة لنا في الكثير من المواضع في هذه الترجمة. وإنني إذ أتوجه أخيراً بخالص الشكر والتقدير إليهم جميعاً، وخصوصاً إلى كلٍّ من السيد رولان لافيت، مؤلّف كتاب أسماء عربية للنجوم[7]، والدكتور فايز فوق العادة، رئيس الجمعية الكونية

---

(7) Roland Laffite, *Des Noms arabes pour les étoiles*, 2e éd. (Paris: Geuthner, 2001).

السورية، والدكتور محمد دبس، أستاذ الإلكترونيات في الجامعة اللبنانية ورئيس تحرير معجم مصطلحات العلم والتكنولوجيا، أخصّ بالشكر الجزيل الدكتور سامي اللقيس، الذي تحمّل مشاق مراجعة الترجمة، ولم يألُ جهداً في سبيل أن تخرج هذه الترجمة على أفضل ما يمكن أن تكون. ولا أنسى فضل والديّ فاطمة وبسام، اللذين كانا خير عون وينبوع تشجيع في كل مفرق من مفارق ترجمة هذا الكتاب.

ريما بركة





تمهيد

يحلّ هذا الكتاب محلّ كتاب من سلسلة «Que sais-je?»، الذي نشره بول كوديرك (Paul Couderc) عام 1945 تحت عنوان **تاريخ علم الفلك** (*Histoire de l'astronomie*) والذي راجعه جان كلود بيكير (Jean-Claude Pecker) عام 1982 تحت عنوان أكثر دقة هو **تاريخ علم الفلك الكلاسيكي** (*Histoire de l'astronomie classique*). ومهما كانت المزايا التعليمية للكتاب الأساسي، وهي مزايا ذكّر بها جان كلود بيكير في طبعته المنقحة، فقد بدا لنا ضرورياً تغيير تصميمه، إذ وجدنا من جهة أنه لا فائدة من الاحتفاظ بجزء من الفصل المخصص لعلم الفلك في العصور القديمة ذلك لأن القارئ الفرنسي بات اليوم يمتلك، على سبيل المثال، طبعتين من النصوص التي يعود تاريخها الى ما قبْل سقراط (وهما طبعة الـ Pléiade وطبعة Editions universitaires de Fribourg). ومن جهة أخرى، كانت تطورات الفيزياء الفلكية تمنعنا من تناول تاريخ هذا العلم إلا باختصاره في سلسلة من النصوص القصيرة التي ليس لها أهمية كبيرة. وهكذا فإن هذا الكتاب ينتهي بفصل خُصّص لما نسميه علم الفلك الكلاسيكي، الذي هو ثمرة علم الميكانيك السماوي وتطوّر التحليل الرياضي من بدايات هذا العلم وحتى انتصاره الذي يظهر من خلال اكتشاف

كوكب نبتون. غير أننا خصصنا كذلك فصلاً لعلم الفلك في العصور الوسطى (وقد تأسّف جان كلود بيكير على إهمال بول كوديرك لهذه المرحلة) وذلك على الأقل للاعتراف بفضل علماء الفلك العرب الذين قاموا بأكثر من المحافظة على الرسالة اليونانية ثم نقلها؛ وهذا الفصل يدين كثيراً لأعمال زميلي ريجيس موريلون (Régis Morelon)، وله أوجّه جزيل الشكر.



الفصل الأول

ماقبْل علم الفلك اليوناني

1. علم الفلك الرياضي لدى البابليين

يتفق مؤرخو العلوم على تقسيم تطور علم الفلك في بلاد ما بين النهرين إلى أربع حقبات تتصل بفترات الجدب والرخاء في بابل. ومهما كان تألّق الحضارة السومرية وقوة نفوذها وامتداده على بلاد ما بين النهرين بأكملها، فإننا لا نعرف شيئاً عن علم الفلك في سومر، باستثناء أسماء بعض النجوم والكواكب التي أُخذت من اللغة السومرية ونجدها في النصوص الأكادية، وباستثناء أساطير حول نشأة الكون التي يُولد فيها العالم من جسد تياماتا(*) (Tiamat) المقطوع إلى نصفين، والتي لا تعلمنا سوى القليل عن علم فلكٍ كان من الواضح أنه لايزال في بدايته.

[إن الهوامش المشار إليها بأرقام تسلسلية هي من أصل الكتاب. أما تلك المشار إليها بـ (*) فهي من وضع المترجمة].

(*) آلهة بابلية تجسّد مياه المحيطات المالحة. تقول الأساطيرُ البابلية إنه عندما قطع الإله مردوك جسدها إلى نصفين، خُلقت السماوات من رأسها ومن أطرافها العلوية، والأرض من أطرافها السفلى.

لا يُرفع الغُموض إلاّ عن علم الفلك الذي ظهر في الفترة التي تبدأ مع نهوض بابل، حوالى العام 1800 ق.م.، ثم تواكب حكم سلالة حمورابي، وتنتهي حوالى عام 1530 ق.م. مع نهب الحثيين لمدينة بابل وبداية ما يُسمى بالعصور المظلمة التي تتسم بغياب الوثائق. وقد وصلنا بعض النصوص من هذه **الحقبة الأولى** التي تدعى بابل القديمة (Paléo-Babylonienne).

أقدم لوحة ذات طابع فلكي واضح تأتينا من نيبور في بابل الوسطى. هذه الوثيقة هي عبارة عن معطيات نجمية تتبع نهجاً حسابياً، وتعرض عالماً ذا ثماني سماوات متراكبة تنقسم فيها سماء الثوابت إلى ثلاث دوائر كل واحدة منها مؤلفة من اثني عشر قطاعاً. وهذه الدوائر ليست مرتبطة بنجوم وكوكبات فحسب، بل هي مرتبطة كذلك ـ وهذا أمر أكثر أهمية ـ بمجموعة أرقام متوالية حسابياً، فتشكل أول أثر معروف لأحد الأدوات الرياضية التي مكّنت البابليين من وصف الظاهرات الدورية.

وهناك نصّان آخران يسلطان الضوء على هذه المرحلة، أحدهما فلكي والآخر تنجيمي. يعطي النص الفلكي لائحة بتواريخ الظهورات والاختفاءات الأولى لكوكب الزهرة خلال سنوات حكم أمي صدوقا (Ammisadouqua) (1646 ـ 1626). وإذا كانت أرصاد الزهرة هذه لا تستلزم علماً فلكياً شديد الإتقان، فإن تأريخها في التقويم القمري لذلك العصر جعل منها نعمة لمؤرخي الأحداث. فهذه المعطيات الفلكية مصحوبة بتوقعات تربط بين الأحداث السياسية المهمة والظواهر السماوية المرصودة. أما النص التنجيمي، فإنه يُطلعنا على ما يجب أن نتوقعه من السنة حسب حال السماء وقت ظهور أول هلال جديد للقمر: فإذا كانت السماء داكنة، كانت السنة سيئة؛ وإذا كانت ساطعة، كانت السنة جيدة؛ وإذا هبّت رياح الشمال في كل السماء قبل ظهور الهلال، كانت الأغلال وافرة.

تمتد **الحقبة الثانية** من العام 1530 ق.م. وحتى العام 612 ق.م.، وهو تاريخ دمار مكتبة نينوى (Ninive) إثر وقوع المدينة بين أيدي الميديين (Mèdes). وتغطي هذه الحقبة حكم الكاشيين (Cassite) ثم السيطرة الآشورية. وتظهر في أواخر هذه الفترة أوّل بينات منهجية للأرصاد الفلكية التي قام بها فلكيو البلاطات الآشورية: وقد جاء أشهر نص من مكتبة آشوربانيبال (Assourbanipal)، آخر ملك عظيم لآشور. وأخذت هذه الألواح اسم إينوما آنو إنليل(*) (Enouma Anou Enlil) (عندما آنو وإنليل)، وفقاً للكلمات الأولى للفاتحة الاحتفالية لقدّاسهم. وتعالج ثلاثة وعشرون لوحاً القمر والشمس والكواكب السيّارة والثوابت والهالات والغيوم والشموس الكاذبة بالإضافة إلى التقلبات والروائع السماوية الأخرى. إن تواريخ وظروف ظهور واختفاء القمر أو علاقاته بالشمس، كلها رموز تعالجها سلسلة الألواح هذه بالتفصيل. وهذه السلسلة كانت قد كُتبت بين 1000 و900 ق.م. ولكنها ثمرة تجميع التوقعات والأرصاد في عدة قرون، ويفترض أن تحتوي على 70 لوحاً تتضمّن 7000 توقع تقريباً. وهناك لوحتان أقل شهرة ولكن أكثر أهمية تاريخياً، يطلق عليهما اسم مول آبين(**) (Moul Apin) (النجمة آبين)، وقد أتيا كذلك من مكتبة آشوربانيبال، ويعطياننا ملخصاً حقيقياً لمعارف ذلك العصر الفلكية. يُعالج اللوح الأول النجوم الثابتة التي توزعت على ثلاثة مسالك فلكية، فيما يحيط الأوسط منها بخط الاستواء. أما اللوح الثاني فإنه يهتم بالقمر والكواكب السيارة، وبالفصول وطول الظلال. وإن كانت

(*) كان من عادة البابليين أن يتّخذوا الكلمات الأولى من كلّ نص عنواناً له.

(**) مول آبين هما أول كلمتين في النص ويُعدّان بالتالي عنواناً له. يقسّم هذا النصُّ السماوات إلى ثلاثة مسالك، كل مسلك منها مخصص لإله واحد، فنجد مسلك الإله إنليل الذي يقع في الشمال، ومسلك الإله إيا الذي يقع في الجنوب، ومسلك الإله آنو الذي يقع عند خط الاستواء.

قراءة هذين اللوحين صعبة وشرحهما دقيق، فإنهما يجعلاننا نستشف من خلالهما الرغبة في وضع مفاهيم فلكية دقيقة مبنية على أسس رياضية. كان من المعروف في تلك الفترة أن كسوفات الشمس لا يمكنها أن تحدث إلاّ في نهاية الشهر القمري وخسوفات القمر في منتصفها. وإذا صدّقنا بطليموس (Ptolémée)، فإن القاعدة التي تقول بتفاوت خسوفات القمر ستة أشهر وأحياناً خمسة أشهر كانت معروفة في عصر نبونصر (Nabonassar) (746 ق.م.).

بدأ البابليون بوضع التقويم الفلكي الحقيقي ابتداء من **الحقبة الثالثة**. من هذه الفترة التي تسمى ببابل الجديدة (Néo-Babylonienne) والتي تمتد من العام 611 ق.م. وحتى العام 540 ق. م.، نملك تقويماً فلكياً للسنة السابعة والثلاثين من حكم نبوخذ نصر الثاني (Nobuchodonosor II) (567 ق.م.). ويُظهر هذا التقويم الفلكي الاهتمام المتزايد الذي أوليَ لمسارات القمر والكواكب السيارة: فقد تم تدوين اقتراناتها بالنجوم الثابتة بدقة، بالإضافة إلى تواريخ أول وآخر إمكانية لرؤيتها. والدوائر السماوية التي كانت مقسومة بالسابق إلى أربعة أجزاء تجتاز الشمسُ كلَّ جزءٍ منها خلال ثلاثة أشهر أصبحت الآن مقسومة إلى اثني عشر جزءاً من 30 درجة.

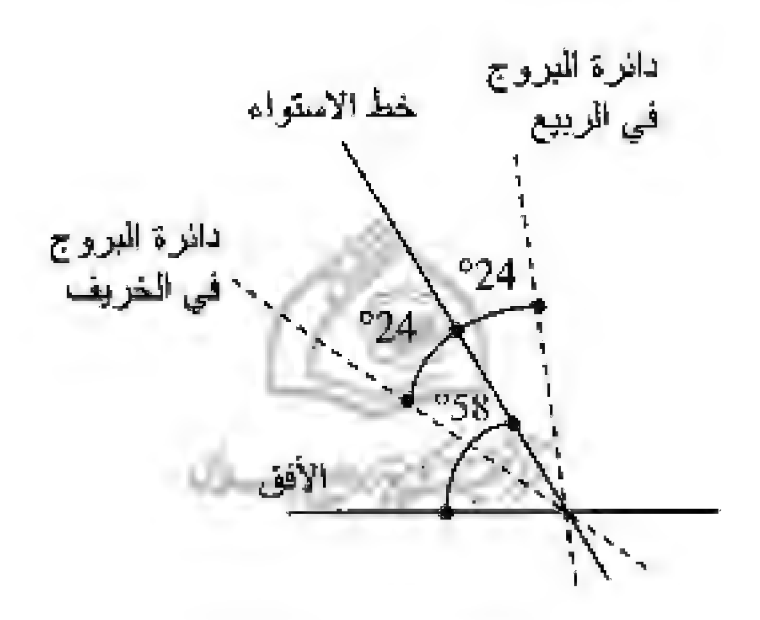
الحقبة الرابعة هي فترة السيطرة الفارسية، وهي تبدأ باحتلال قوروش (Cyrus) لبابل عام 538 ق.م. وتنتهي في العام 75 من عصرنا الحالي، وهو التاريخ الذي بدأ فيه استعمال الكتابة المسمارية بالتلاشي. وقد شهدت هذه الفترة الآشورية التطورات الأكثر أهمية، وبدأ الميل إلى الوصف الرياضي يُرسم بوضوح. غير أنه علينا انتظار القرون الثلاثة الأخيرة قبل عصرنا، وهي القرون التي حكم خلالها السلوقيون (Séleucides) والأشكانيون (Arsacides)، لكي تظهر

النصوص الأولى التي تتضمن دراسات للحركات الفلكية مبنية على الرصد المتواصل، وعلى نظريات رياضية مبنية ببراعة على علم الجبر. وهكذا تمكن علماء بلاد ما بين النهرين، خلال ألفية ونصف، من جمع الأرصاد الفلكية ووضع النظريات الرياضية التي مكنتهم من تقديم وصف تجريبي لحركات القمر والشمس والكواكب السيارة ولتغيرات النهار والليل.

II. علم الفلك ومشاكل التقويم

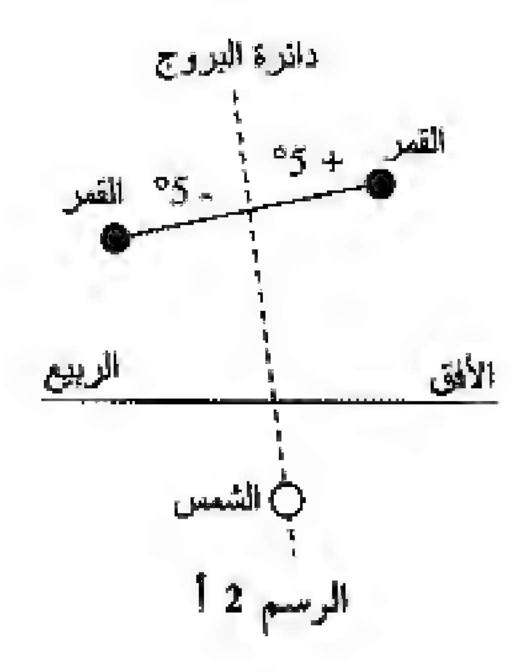
إن تطورات علم الفلك تدين بالكثير للحاجة الملحّة إلى وضع التقويم. وتقويم بابل كان قمرياً: كان الشهر يبدأ في الليلة التي يبزغ فيها الهلال للمرة الأولى من خلال أشعة المغيب. وبالنتيجة، فإن اليوم البابلي يبدأ عند المساء، ويوافق أول يوم في الشهر اليوم الأول الذي يمكن فيه رؤية الهلال. ويولّد ترسيخ تقويم قمري مماثل العديد من المسائل النظرية المعقدة ويتطلب بالنتيجة استخدام تقنيات محددة. يجب أن يتضمن الشهر القمري عدداً صحيحاً من الأيام. وإذا كانت الأشهر القمرية أشهراً غير منتظمة، ولا تتضمن أبداً أكثر من ثلاثين يوماً أو أقل من تسعة وعشرين، فإن السؤال يكمن في معرفة أي أشهر تتألف من تسعة وعشرين يوماً وأيها تتألف من ثلاثين يوماً. ويتطلب الجواب معرفة حركة الشمس وحركة القمر وتغيّر المسافة التي تفصل بينهما. وأول إمكانية لرؤية الهلال تثير مسائل رصدية ونظرية. فرؤية الهلال تتطلب أن تكون الشمس منخفضة بمقدار كافٍ في الأفق. وإذا بقي الهلال غير مرئي في الليلة التي تسبق اليوم الأول من الشهر، يجب عندها تحديد المسافة (أو التطوّل) بين الشمس والقمر التي تجعل هذا الأخير مرئياً. لكن، إذا كانت النجوم في مكان محدد، وطوال السنة، تطلع وتأفل وفقاً لزوايا ثابتة متعلقة بميل

خط الاستواء فوق الأفق، فإن حركات الشمس والقمر النسبية تتم تقريباً على طول دائرة البروج التي يشكل مسطحها زاوية تبلغ 24 درجة تقريباً مع مسطح خط الاستواء. مما يوجب تحديد تغيرات الزاوية بين دائرة البروج والأفق خلال السنة، إذ إن التطوّل نفسه يعطي نتائج مختلفة تبعاً لهذه الزاوية وبالنتيجة حسب العصر، فعلى سبيل المثال، تتراوح هذه الزاوية في بابل بين 34 و82 درجة (انظر الرسم 1).

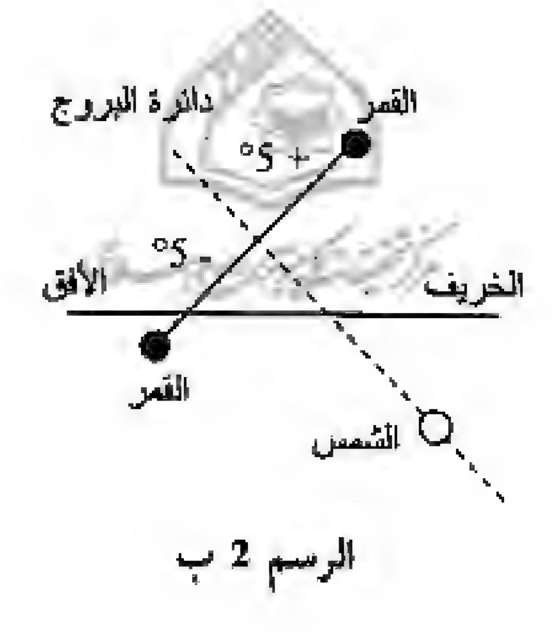


الرسم 1

إضافة إلى ذلك، فإن القمر لا يتحرك بالضبط على دائرة البروج، فهو يتنحى عنها ما يقارب الـ 5 درجات. وإذا كان تأثير هذا التفاوت على إمكانية رؤية القمر بسيطاً عندما تكون دائرة البروج أكثر ما تكون عمودية فوق الأفق، كما هي الحال في الربيع (انظر الرسم 2 أ)، فإن الأثر يكون في أقصاه في الخريف، عندما تكون دائرة البروج أكثر ما تكون مائلة فوق الأفق (انظر الرسم 2 ب).



الرسم 2 أ



الرسم 2 ب

كل هذه التأثيرات مستقلة عن بعضها البعض، وهي تُنتج في مجملها تغيرات شديدة التفاوت وشديدة التعقيد في طول الشهر القمري: وإحدى الإنجازات الأكثر تميزاً للعلوم الدقيقة في الحضارات القديمة هي الفصل بين الأسباب والنتائج المختلفة ووضع نظرية تتيح توقع تأثيرها العام.

وينبغي أن نضيف إلى ذلك أن البابليين واجهوا صعوبات كبيرة في مطابقة تقويمهم القمري مع الفصول، أي مع حركة الشمس. فالأشهر الاثنا عشر غير المتساوية لا تعطي سوى ثلاثمئة وأربعة وخمسين يوماً وبالنتيجة فهي تتخلّف بأكثر قليلاً من أحد عشر يوماً عن السنة الشمسية: ويبلغ التخلف خلال ثلاث سنوات شهراً واحداً: عندها كان يُعاد أحد الأشهر مرتين، بقرار من الملك ومن دون قاعدة محددة، على ما يبدو. وهكذا، نجد أن أحد الألواح من عهد حمورابي يعطي أمراً بهذه العملية، في حين أن واحداً آخر يطلعنا على المقاييس التي كانت تعلمهم بالوقت الذي ينبغي فيه زيادة الشهر الكبيس: كان البابليون قد اختاروا مجموعات من النجوم أو الكوكبات (اثنين أو ثلاث لكل شهر) التي يجب أن يحدث شروقها الشمسي في شهر معين. وعندما كانت تحصل هذه الشروقات خارج هذا الشهر، كان يتم تصحيح التقويم. غير أن هذه العمليات ظلت غير مضبوطة بشكل جيد لفترة طويلة (لن يتم ضبط عملية إضافة الأشهر إلا في العام 532 ق.م.). هذا التسلسل الزمني غير الثابت يجعل الكثير من معطيات بلاد ما بين النهرين الفلكية غير صالحة للاستعمال. غير أن هيبارخوس (Hipparque) وبطليموس توصلا إلى وضع تقويم متواصل يعود إلى العام 746 ق.م.، وقد استخدموا في ذلك وثائق لم تصل إلينا.

بيد أن وضع الفلكيين لتقويم قمري قد أسفر عن نتائج إيجابية لعلم الفلك نفسه. وقد تطلب ذلك وضع جداول بحركات القمر والشمس اليومية، وتحديد آخر إمكانية لرؤية الهلال القمري، وأول إمكانية تليها لرؤيته. ولأجل ذلك تم تحديد منتصف فترة عدم الرؤية، أي لحظة اقتران الشمس بالقمر. وأخيراً، توجّب تنسيق كل هذه المعطيات مع القواعد التي تعطي خط عرض القمر لتحديد إذا ما سيكون هذا الأخير قرب دائرة البروج عند المقابلة أو الاقتران. ويكون

هنالك خسوف للقمر في الحال الأولى، وكسوف للشمس في الحال الثانية. وإذا لم يكن القمر قريباً من دائرة البروج، فلن يكون هناك أي كسوف، وبالتالي فإن حساباً رياضياً بسيطاً ومنطقياً هو الذي يؤدي إلى وضع كل الجداول الضرورية لإنشاء تقويم قمري، وكذلك لتوقع خسوفات القمر. ومع الأسف، فإن توقع كسوف الشمس أكثر تعقيداً، إذ يجب، بالإضافة إلى ذلك، معرفة المنطقة من الأرض التي سيمر بها محور المخروط الظلي، ومن أجل ذلك معرفة كيف تحدد تحديداً غاية في الدقة المسافات بين الشمس والأرض، وبين القمر والأرض، هذا بالإضافة إلى الأبعاد المتعلقة بهذه الأجرام السماوية. غير أننا لا نجد أي أثر لهذه الكميات على ألواح بلاد ما بين النهرين. إن علم الفلك البابلي لم يكن يسمح إلاّ بتوقع إمكانية أو عدم إمكانية حصول كسوف للشمس، ولكنه بالتأكيد لم يستطع تحديد ما إذا كانت رؤية الكسوف ممكنةً أو غير ممكنة بالنسبة لمكان محدد.

وفي هذه الحال، فإن الذين يصرون على أنه تم توقع كسوفات الشمس منذ القدم من دون السيطرة على المتغيرات الوسطية اللازمة لذلك، يستندون على معرفة دورة افتراضية تعيد في فترة زمنية ثابتة الكسوفات نفسها إلى الأمكنة ذاتها. وأشهر هذه الدورات هي ساروس (Saros)، وهي دورة من ستة آلاف وخمسمئة وخمسة وثمانين يوماً وثلث اليوم، أي ثماني عشرة سنة وعشرة أو أحد عشر يوماً. وبالرغم من أن جمينوس (Géminos) يؤكد في **مدخل إلى الظواهر** (*L'Introduction aux phénomènes*) أن الكلدانيين كانوا يعرفون دورة من تسعة عشر ألفاً وسبعمئة وستة وخمسين يوماً، أي من ثلاثة ساروس، فإنه لم يوجد، حتى اليوم أيُّ لوحة معروفة تحمل أي أثر لهذه الدورة، أو لأي دورة أخرى تم استعمالها ببساطة. زد على ذلك أن أي محاولة لوضع دورة كانت لتتطلب الوصول إلى قرون من التسجيلات المحلية، وذلك لأن كسوفات

الشمس في مكان محدد نادرة جداً. والرسالة الوحيدة التي كان يستطيع أن يعلنها عالم الفلك في بلاط سلوقس الأول نيكاتور(*) (Séleucos I^{er} Nicator) هي: لن يكون هناك كسوف للشمس في هذا الشهر. والحقيقة أن دورة ساروس لم تظهر قبل القرن الثالث [ق.م.]، ويجب بالنتيجة نسبها إلى الإغريق وإلى نظريتهم عن الكسوف.

III. تقاويم ومتواليات حسابية ودالاّت متعرجة

لنأخذ المثال الذي أعطاه نوجباور (O. Neugebauer) في كتابه **العلوم الدقيقة في الحضارات القديمة** (*The Exact Sciences in Antiquity*). وهو عبارة عن تقويم للعام 179 من الحقبة السلوقية (133 ـ 132 ق.م.).

	XII_2	28، 55، 57، 58	22، 8، 18، 16	الحمل
2,59	I	28، 37، 57، 58	20، 46، 16، 14	الثور
	II	28، 19، 57، 58	19، 6، 14، 12	الجوزاء
	III	28، 19، 21، 22	17، 25، 35، 34	السرطان
	IV	28، 37، 21، 22	16، 2، 56، 56	الأسد
	V	28، 55، 21، 22	14، 58، 18، 18	العذراء
	VI	29، 13، 21، 22	14، 11، 39، 40	الميزان
	VII	29، 31، 21، 22	13، 43، 1، 2	العقرب
	VIII	29، 49، 21، 22	13، 32، 22، 24	القوس
	IX	29، 56، 36، 38	13، 28، 59، 2	الجدي
	X	29، 38، 36، 38	13، 7، 35، 40	الدلو
	XI	29، 20، 36، 38	12، 28، 12، 18	الحوت
	XII	29، 2، 36، 38	11، 30، 48، 56	الحمل

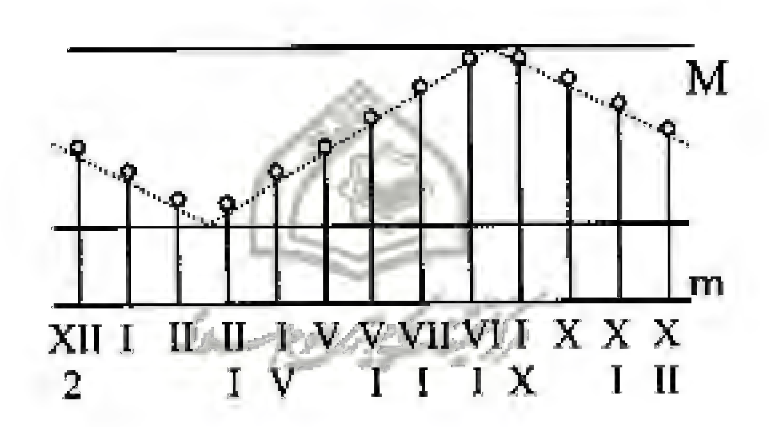
ولنذكّر في البداية أن العدّ البابلي هو أساساً ستّوني. وهكذا،

(*) هو قائد من قوّاد الإسكندر الكبير، حكم بابل بعد وفاة هذا الأخير ثم سمّى نفسه ملكاً عام 312 ق.م. وأسس سلالة السلوقيين الحاكمة.

فإن العدد 2,59 المكتوب أمام العمود الأول يُقرأ 2 ضرب 60 زائد 59، أي 179. وهذا يعني أن هذا التقويم قد أُعطي للعام 179. إن العمود الأول مخصص للتواريخ، وهي تبدأ بـ XII_2، والدليل (l'indice) 2 يدل على أن الشهر هو الثاني عشر المضاف، أي أنه الشهر الثالث عشر الكبيس. ثم يأتي ذكر السنة وأشهرها الاثني عشر. يجب الآن فهم التركيبة الحسابية للعمود الثاني. كل أعداد الأسطر الثلاثة الأولى تنتهي بـ 57 و58؛ وأعداد الأسطر الستة التالية تنتهي بـ 21 و22؛ وأعداد الأسطر الأربعة الأخيرة تنتهي بـ 36 و38. إذا أردنا العودة إلى مصدر الاختلاف الذي تظهره هذه الأعداد، علينا تفحُص أعداد المركزين الأولين. تعطي الأسطر الثلاثة الأولى متتالية تناقصية، والأسطر الستة التي تليها تعطي متتالية تزايدية، والأسطر الأربعة الأخيرة تعطي متتالية تناقصية من جديد. أضف إلى ذلك أن الفرق ثابت في كل مجموعة ويساوي 18. إن دراسة العمود الثالث هي التي تعطي المعنى الفلكي للعمود الثاني الذي رأينا تركيبته الحسابية لتوّنا (متواليات حسابية بنسبة 18). وبما أن العمود الثالث تتبعه صور البروج الفلكية، فإنه من دون شك يعطينا مواقع وفقاً لخطوط طول دائرة الكسوف. وهكذا، فإن الأعداد 22، 8، 18، 16، التي يتبعها رمز برج الحمل، تعطينا موقع جرم سماوي موجود في برج الحمل عند الدرجة 28 والدقيقة 8 والثانية 18 والثالثة 16. وهكذا نكتشف أنه عند إضافة قيمة السطر الثاني من العمود الثاني إلى هذه القيمة من السطر الأول نحصل على 50 درجة و46 دقيقة و16 ثانية و14 ثالثة، وهو موقع جرم سماوي يوجد عند الدرجة 20 والدقيقة 46 والثانية 16 والثالثة 14 في البرج التالي، أي في برج الثور. وهذا بالتحديد ما يشير إليه السطر الثاني من العمود الثالث. وإذا أخذنا بعين الاعتبار التقدم بحوالى برج واحد (30 درجة) في الشهر، فإننا نجد أنها تعطي في الحقيقة مسار الشمس الشهري على

طول دائرة البروج. وإذا أخذنا بعين الاعتبار ما نعرفه عن التقويم البابلي، يمكننا تحديد معنى العمود الأول: I، II، ... لا تمثل الشهر الأول والثاني و... بأكملهم، وإنما تمثل أوقات الاقتران المتوسط في نهاية هذه الأشهر. وهكذا، فإن هذا التقويم يعرض الاختلاف السنوي لسرعة الشمس.

ولكن، لنعد إلى العمود الثاني لنعطي رسماً بيانياً للتزايدات والتناقصات المتعاقبة بنسبة 18. إذا تم تمثيل مختلف الأسطر بنقاط متساوية البعد، فإننا نحصل على نقاط مصفوفة على خطوط منحدرة +18 و ـ 18 (انظر الرسم 3).



الرسم 3

يطلق مؤرخو علم الفلك على هذه المتتاليات عبارة «دالّة متعرجة خطية». وتنحصر تغيرات هذه الدالّة بين قيمة قصوى (M) تساوي 30، 1، 59،0، وقيمة دنيا (m) تساوي 28، 10، 39،40. إنها إذاً دالّة دورية ذات مدًى يساوي 1، 51، 19، 20، وقيمة متوسطية تساوي 29، 6، 19، 20. ويمكننا تحديد دورة هذه الدالّة، وهي تساوي 12؛ 22، 8، 53، 20 شهراً (اثنا عشر شهراً، 22 جزءاً من ستين من الشهر، ... إلخ)، أي أن حدين أقصيين يفصل بينهما أكثر بقليل من اثني عشر شهراً اقترانياً متوسطياً وثلث الشهر.

IV. علم الفلك عند المصريين القدامى (الفراعنة)

لقد شغلت العلوم، وعلم الفلك بالأخص، دوراً متواضعاً في الحضارة المصرية، وركدت في مرحلة جد بدائية. بيد أن علماء الفلك المصريين تركوا إرثاً للأجيال اللاحقة، والإرث الأكثر فائدة والأكثر تناقضاً الذي تركه المصريون كان حساب السنة المصرية. تتضمن هذه السنة تماماً ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً مقسمة على اثني عشر شهراً من ثلاثين يوماً، يضاف إليها خمسة أيام نسيئة مجموعة في نهاية السنة. وفي الفترة الممتدة من الدولة الحديثة حتى السيطرة الرومانية، حملت أشهر السنة المصرية الاثنا عشر أسماء معروفة، وهي: توت (Thot)، بابه (Phaophi)، هاتور (Athyr)، كيهك (Chioack)، طوبه (Tybi)، أمشير (Mechir)، برمهات (Phamenoth)، برمودة (Pharmuti)، بشنس (Pachon)، بؤونة (Payni)، أبيب (Epiphi)، مسرى (Mesori). وإذا كانت هذه الأسماء مختلفة في الدولة الوسطى، فإن الأشهر كانت، منذ هذا العصر، مجموعة كل أربعة سوياً، في ثلاثة فصول. وكان يطلق على هذه المجموعات المؤلفة من أربعة أشهر اسم أشهر الفيضان وأشهر البَذْر وأشهر الحصاد، وكأنهم بهذا التقسيم وهذه الأسماء يشيرون إلى أن السنة المصرية عندما تم إدخالها كانت مخصصة لكي تكون أساس تقويم زراعي. ويشكل فيضان النيل الذي يعطي حياة جديدة للضفاف الجافة، الحدث الأكثر أهمية في الحياة الزراعية المصرية. وفي مصر القديمة، كان فيضان النيل يتوافق تقريباً مع الشروق الشمسي لسوثيس (Sothis)، النجم الذي يسميه الأوروبيون اليوم سيريوس(*) (Sirius). ونجد على عاج أحد القبور في

(*) هو النجم المعروف عند العرب باسم الشعرى اليمانية. اتّخذ هذا النجم عند المصريين القدامى أهمية كبيرة. فبالإضافة إلى دوره في حياتهم الزراعية وفي وضع التقاويم، =

أبيدوس (Abydos) يضع كلمات تخفي سوثيس الذي كان المصريون القدامى يعبدونه: «رسول السنة الجديدة والفيضان». ونعرف كذلك أن نصوصاً، منذ الدولة الوسطى وخلال الدولة الجديدة، تشير بوضوح إلى اعتبار شروق سوثيس الشمسي بداية للسنة. غير أن آراء الاختصاصيين تختلف حول نوع السنين التي تشير إليها هذه النصوص. يميل بعضهم إلى اعتبارها سنة سوثيس حقيقية، كانت تمتد من الشروق الشمسي لهذا النجم وحتى بزوغه التالي، وبعضهم الآخر يتقدّم بفرضية اعتبارها سنة قمرية كانت تبدأ يوم اختفاء القمر القديم الذي يلي شروق سوثيس الشمسي، وكانت تضم اثني عشر أو ثلاثة عشر شهراً قمرياً. ويعتقد باركر (R. A. Parker)، وهو مؤرخ علم الفلك المصري وأحد مؤيدي الفرضية الأخيرة، أن تقويماً قمرياً هدفه الأساسي تحديد مواعيد الأعياد الكبيرة كان موجوداً قبل أن يتم إدخال التقويم المدني، المبني على السنة المصرية، في بداية الألفية الثالثة. ماذا كانت التعديلات والتحسينات التي تم إدخالها إلى التقويم القمري عبر السنين؟ وما هي القواعد الثابتة التي كانت تربط هذا التقويم بالسنة المدنية؟ وهل كان هذان التقويمان يقاربان تقويماً ثالثاً زراعياً؟ كثيرة هي الأسئلة التي تبقى من دون جواب، أو ذات أجوبة تكهنية وغير مؤكدة. ونحن نتعرض هنا للغز السنة المصرية وللغز أصلها الزراعي. فالسنة الشمسية تتضمن ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً وربع اليوم، وينتج عن هذا أن يوماً ينقص كل أربع سنوات مصرية، وأن الأعياد تنزلق عبر الفصول، والفصول عبر الأشهر. ولا بد أن المزارعين لم يرق لهم

= اتخذه المصريون دليلاً لهم في بناء هرم خوفو وتوجيهه، إذ يواجه هذا النجم عند طلوعه من جهة الجنوب أحد أوجه هذا الهرم في الوقت نفسه الذي يقابل فيه النجمُ القطبي وجهاً آخر من أوجهه الثلاثة بحيث تلتقي أشعة النجمين في الحجرة الملكية.

هذا التشرد الذي أسفر عن تسمية السنة المصرية بالسنة المبهمة.

ومهما يكن الأمر، فإن السنة المصرية، رغم أنها كانت مبنية على أسس عملية لا تمت بصلة كبيرة إلى المسائل الفلكية، فقد كان بإمكانها إرضاء علماء الفلك أكثر من أي نظام تقويمي آخر. إذ إنهم اعتمدوا كلهم، من بطليموس إلى كوبرنيكوس (Copernicus)، على السنة المصرية في حساباتهم. لقد كانت الحسابات الفلكية بحاجة إلى مقياس للوقت ذي وحدة ثابتة، من دون أي نوع من الإضافات. إن تحديد عدد الأيام التي تفصل بين يومي رأس سنتين من التقويم البابلي (أو أي تقويم يوناني) تفصل بينهما على سبيل المثال خمسون سنة، بشكل مهمة صعبة حيث احتمالات الخطأ عديدة. إن هذه المدة في السنوات المصرية تساوي بكل بساطة خمسين ضرب ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً. والفوائد لتحديد الوقت الفاصل بين رصدين فلكيين واضحة. وإذا اعتمد علماء الفلك هذه السنوات كتقسيم لمقياس للوقت، فإن ذلك لم يلق النجاح نفسه كأسس لتقاويم مدنية، وحتى لو أن الملك يزدجرد الثالث (Yazdgard III) قام ببناء إصلاح التقويم الفارسي على السنة المصرية وذلك قبل سقوط السلالة الساسانية بوقت قصير، وحتى لو أننا نشهد كذلك محاولات في هذا الاتجاه خلال القرون الوسطى.

وهناك إرث آخر خلّفه المصريون لعلماء الفلك، ولكنه انتهى في خرج المنجّمين، وهو «الوجوه»(*) (عشر درجات من دائرة البروج). علينا أولاً التكلم باختصار عن الشروق الشمسي للنجوم.

(*) نجد كلمة وجه (wajh) في الصفحة 84 من كتاب: Yahya Michot, *Avicenne, réfutation de l'astrologie* (Beyrouth: Al-Bouraq, 2006).

ويقابلها في الملاحظة 4 من الصفحة 85 الكلمة الفرنسية «Décan».

نرى النجوم في كل ليلة تبزغ في الأفق الشرقي وتعلو في السماء وتبلغ الأوج عند مرورها عند خط الزوال، ثم تنزل وتغيب عند الأفق الغربي. إذا شاركت الشمس في هذا الدوران اليومي، وبالإضافة إلى هذه الحركة، إذا غرقت النجوم بعد شروق الشمس بالنور الذي يبثه الجو واختفت، فإن الشمس تنحرف يوماً بعد يوم باتجاه الشرق بين حقل النجوم الثابتة، وتؤخر بالنتيجة شروقها يوماً بعد يوم بالنسبة إلى نجمة محددة. ونقول عن نجمة تبزغ عند فجر ما لتختفي مباشرة في ضياء اليوم الطالع، إنها تقوم بشروقها الشمسي، ويمكننا أن نأخذ هذه الإشارة على أنها علامة آخر ساعة من الليل. ولقد تم بناء استعمال الوجوه على هذه الظاهرة. وكان بإمكان المصريين القدامى أن يأخذوا كل يوم نجماً جديداً كعلامة على آخر ساعات الليل. بيد أن الدقة التي كانوا ليحصلوا عليها، وتعقيد الجداول المرتبطة بها ما كانت لتضاهي الهدف المنشود، ألا وهو تحديد ساعات القداديس الليلية. ولهذا، فقد اختاروا ملاءمة ساعات الليل مع تقويمهم، وبما أن الأشهر كانت مقسومة إلى عشريات من الوجوه، فقد تم تقسيم النجوم التي تكون «في الخدمة» بالطريقة نفسها. وقد تم اختيار نجمة ن$_1$ لتشير إلى الساعة الأخيرة من الليل، وذلك لمدة عشرة أيام، ثم نجمة ن$_2$ للأيام العشرة التي تليها، وهكذا دواليك، بحيث إن ساعة الليل الأخيرة كانت تنتقل، خلال عشرة أيام، من الفجر إلى الليل الحالك لكي تعود إلى الفجر مع الشروق الشمسي للوجه التالي. وإذا كانت ن$_1$ تشير إلى وجه الساعة الأخيرة، فإن ن$_2$ تنوب عنها بعد عشرة أيام، وتصبح ن$_1$، التي تكون وقتها مرئية خلال الليل، علامة وجه الساعة التي قبلها. إذا كانت السنة تتضمن ثلاثمئة وستين يوماً، أي ستاً وثلاثين عشراً، فإن ستاً وثلاثين وجهاً ستنقضي قبل أن تشير ن$_1$ من جديد إلى وجه الساعة الأخيرة. إن نظام الوجوه هو إذاً نظام من 36 عموداً ترافقه جيل

للأيام الخمسة الإضافية. يبقى تحديد عدد الأسطر التي سيتضمنها النظام. والجواب تفرضه احتمالات الرصد: إذا لم يكن الشروق الشمسي لنجم مرئياً إلاّ في الليل، فإن عدد الساعات التي يحددها الوجه سيكون مساوياً لعدد الوجوه التي يمكن رصد بزوغها خلال ليلة واحدة. ويختلف هذا العدد من فصل إلى آخر إلاّ عند خط الاستواء، ففي مصر، في الصيف، عند الشروق الشمسي لسوثيس، وعندما تكون الليالي الأقصر طولاً، لا يمكننا رصد سوى الشروق الشمسي لاثني عشرة وجهاً في ليلة واحدة. وبالنتيجة فإن النظام سيكون مؤلفاً من اثني عشرة سطراً، وهو المصدر في تقسيم الليل إلى 12 ساعة.

ومن بين الرسوم التي تزين قبر سيتي الأول (Séti Ier)، وهو فرعون من الأسرة الحاكمة التاسعة عشرة، حكم حوالى العام 1300 ق.م.، نكتشف رسماً لساعة شمسية يرافقها طريقة الاستعمال. وهذه الساعة تشير إلى عشر ساعات بين شروق الشمس وغروبها. عشر ساعات يضيف إليها المصريون ساعة للفجر وساعة للغسق. وهي تساوي مع ساعات الليل الاثنتي عشرة أربعاً وعشرين ساعة غير متساوية، وهي على الأغلب مصدر الأربع والعشرين ساعة الفصلية التي نجدها في الفترة الإغريقية.

تظهر الوجوه لأول مرة قبل هذه الفترة بكثير على القسم الأعلى لنواويس من الدولة الوسطى، في وقت كان التقويم المدني قد وُضع منذ فترة طويلة كما كان قد تم ربطه بالكوكبات الست وثلاثين. وتمثل اللوحات الفلكية الموجودة على أعلى النواويس رسومات للسماء مع أسماء كوكبات الوجوه التي تفصل بينها عشرة أيام على مدار السنة، وتشكل بالنتيجة 36 عموداً و12 سطراً، سطر لكل ساعة من ساعات الليل الاثنتي عشرة. ويصعد اسم الوجه سطراً من عمود

إلى آخر، مما يعطي شكلاً مائلاً أسفر للأسف عن تسميته بالتقويم المائل في حين أنه عبارة عن ساعة نجمية. ويسمح هذا الجدول المائل بمعرفة ساعة الليل بمجرد البحث عن الوجه الذي يبزغ في عمود العشرة أيام الجارية.

بيد أن علماء الفلك سينسون الوجوه، وسيفضلون الأسطرلاب أو الأسطرلاب الليلي لمعرفة الساعات الليلية، وسيختارون دائرة النجوم الموجودة حول النجم القطبي كساعة نجمية. فنظام الوجوه يعاني من الخلل ذاته الذي تعاني منه السنة المصرية: الوجوه تتنقل، ببطء من دون شك، ولكنها تتنقل عبر التقويم وذلك بفعل مبادرة الاعتدالين.



الفصل الثاني

علم الفلك الرياضي عند اليونان

إن وضع تراكيب من الحركات الدائرية في سبيل تقديم عرض عن الحركات السماوية هو ما يميز بشكل أساسي علم الفلك اليوناني النظري الهندسي، عن علم الفلك البابلي التجريبي الحسابي الذي كان مبنياً على وضع التقاويم. إن استعمال أنظمة كهذه، ونحن نعتبرها اليوم بمثابة نماذج، يُعد مرحلة حاسمة في تطور هذا العلم: مهما كانت حدود صلاحية هذه النماذج (وذلك لأنه سيأتي وقت تسفر فيه المواجهة مع الحقيقة عن تحديث هذه الحدود، وبالنتيجة عن ضرورة إعادة التفكير في النماذج)، فإن علم فلك نظري كهذا يكون أفضل من علم فلك تجريبي، مهما كان عدد ونوعية الأرصاد التي تمكّن من وضع جداوله. غير أن علماء الفلك اليونانيين يَدينون لأسلافهم البابليين، فقد تم تحديد المتغيرات الوسطية في الأنظمة الهندسية عن طريق الأرصاد. وتُظهر دقة المقاييس المستعملة منذ بداية علم الفلك اليوناني كم أن علم الفلك هو ابن عصره. وعلى سبيل المثال، أشار مؤرخ العلوم كوغلر (Kugler) أنه يمكن إيجاد كل المتغيرات الوسطية التحتية لنظرية القمر «الهيبركية» انطلاقاً من النصوص الفلكية البابلية. غير

أننا لا نعرف بشكل مؤكد طرق نقل المعلومات البابلية ولا العصور التي تم فيها نقلها.

1. ميتون

إن دورة ميتون (Méton) تشكل أول أثر شبه أكيد لتأثير معطيات علم الفلك البابلي على الممارسة الفلكية اليونانية. لا نعرف عن حياة وأعمال ميتون سوى أنه كان قد اشتُهر في العام 431 ق. م. وإذا لم يصلنا أيّ مؤلَّف له، فإن التاريخ يحفظ عنه إدخاله دورة قمرية شمسية، تسمى اليوم «الدورة الميتونية»، وكانت تدعى قديماً «مرحلة تسع عشرة سنة»، أو «سنة ميتون» أو حتى «السنة الكبيرة». والسنة الكبيرة لأفلاطون (Platon)، التي تعيد الأرواح إلى النقطة نفسها من مسارها بعد انقضاء ستة وسبعين ألف سنة، هي مضاعف أربعة آلاف للسنة الميتونية. كل التقاويم اليونانية في أيام ميتون كانت قمرية شمسية، أي أن الأشهر كانت نظرياً أشهراً قمرية، يشير إلى بداية كل منها رؤية الهلال، في حين أن السنة كانت شمسية. واجه ميتون إذاً المشكلة نفسها التي واجهها زملاؤه البابليون، ألا وهي إضافة أشهر كبيسة. وأول دلالة على تأثير البابليين هي استخدام الأشهر الكبيسة لإنشاء السنة الميتونية، وذلك لأن تسع عشرة سنة شمسية تتطابق بشكل جيد مع مئتين وخمسة وثلاثين شهراً قمرياً اقترانياً صحيحاً، في حين أن تسع عشرة سنة من اثني عشر شهراً لا تساوي سوى مئتين وثمانية وعشرين شهراً. مما يؤدي إلى ضرورة إدخال سبعة أشهر إضافية إلى الدورة الميتونية. ورغم أن هذه الدورة لم يبدأ استخدامها في التقويم المدني في بابل مع إضافة الشهر الثالث عشر إلاّ ابتداء من العام 366 ق. م.، فإننا نعلم أن هذه الدورة المؤلفة من تسع عشرة سنة كانت معروفةً في بلاد ما بين النهرين منذ بداية القرن الخامس. وتسمح معطيات عددية واضحة بالتكهن بما يلي ذلك. بما

أن تسع عشرة سنة شمسية كانت تتضمن ستة آلاف وتسعمئة وأربعين يوماً، فإن الدورة الميتونية كانت تتضمن مئة وعشرة أشهر جوفاء من تسعة وعشرين يوماً، ومئة وخمسة وعشرين شهراً كاملاً من ثلاثين يوماً. ويظن المؤرخون أنه من المنطقي الاعتقاد أن ميتون قد أدخل شهراً إضافياً إلى السنوات الثالثة والسادسة والثامنة والحادية عشرة والرابعة عشرة والسابعة عشرة والتاسعة عشرة من دورته، من دون أن يكونوا أكيدين من هذه السلسلة. أضف إلى ذلك أننا لا نعرف شيئاً عن توزيع الأشهر الكاملة والأشهر الجوفاء، وهو توزيع لم يكن موجوداً في بابل، حيث طول الشهر كان يحدد عن طريق رصد أول ظهور للهلال النحيف الذي يلي الهلال الجديد. والمعلومة الأخرى الوحيدة التي نملكها عن دورة ميتون هي أنه كان يستعمل أسماء أشهر تقويم أثينا، وأن أول دورة عند ميتون تبدأ في 27 حزيران/يونيو من العام 431 ق. م.، تحت أرخونتية الأبسوديين (Apseudes) في أثينا، وهو اليوم الذي قام فيه ميتون بنفسه برصد الانقلاب الصيفي.

II. متطلبات أفلاطون

وفقاً لسمبليسيوس (Simplicius)، يعود الفضل إلى أفلاطون في صياغة المسألة الفلكية: ما هي الحركات الدائرية المنتظمة والمتناسقة التي ينبغي اعتمادها كفرضيات من أجل إنقاذ الظواهر(*) التي تبدو بها الكواكب السيارة؟ لقد تم تحديد هدف علم الفلك بوضوح.

(*) شكّلت عبارة «إنقاذ الظواهر» مُسلَّمة مهمة في علم الفلك اليوناني، وكان أفلاطون أوّل من استعملها، إذ إنه وضعها ضمن البرنامج الذي حدّده لعلماء الفلك، وهي تعني شرح حركات الأجرام السماوية.

وتشاء التقاليد أن تثير هذه المسألة في الطليعة جهود أودوكس(*) (Eudoxe de Cnide) الذي ابتكر نظاماً من كرات مشتركة المركز(**).

ونجد في البداية كرة النجوم الثابتة تحيط بالكون وهي تسمى **غير متنقلة**. وهي تدور بانتظام في يوم نجمي واحد من الشرق إلى الغرب حول محور العالم. والنظام معقد أكثر بالنسبة للشمس والقمر والكواكب الخمسة المرئية بالعين المجردة، فكل واحد من هذه الكواكب السيارة لديه آلية خاصة. وفي التداخل الأرضي المركز للكرات التي ستنقذ الظواهر، يقع الجرم السماوي على خط استواء الكرة الأكثر قرباً من الداخل. أما الكرات الأخرى، فإنها لا تحمل أي جرم سماوي، وسيطلق عليها ثيوفراسطس (Théophraste) اسم كرة من دون جرم سماوي، وأودوكس اسم كرة تدور باتجاه معاكس. إن **الكرة الأولى** الأكثر خارجية تدور حول محور يمر في مركز العالم. **أما الكرة الثانية** فإنها تساهم في حركة الأولى. ولكن هذه الحركة تتناسق بداخلها مع حركة دوران ثانية منتظمة لديها محور خاص واتجاه خاص وسرعة خاصة. وتتلقى **الكرة الثالثة** الحركة المنظمة مسبقاً وتضيف إليها دورانها المنتظم الخاص. ويستمر التنظيم بهذا الشكل إلى أن تنتج الكرة التي تحمل الجرم السماوي الحركة المركبة التي ستحافظ على الحركات الظاهرة. وتنطوي التنظيمات المختلفة على ميزتين مشتركتين هما:

(*) أودوكس (455 ـ 406 ق. م.): هو رياضي وعالم فلك يوناني، كان أول من حاول وضع نظرية حول حركة الكواكب (انظر الملاحظة التالية).

(**) وضع أودوكس، وهو أحد تلامذة أفلاطون، نظام الكرات المشتركة المركز لتفسير حركات الكواكب. وتقضي نظريته بأن الكون مؤلف من مجموعة كرات متداخلة ضمن بعضها البعض، تدور حول كرة الأرض التي تشكّل مركز العالم. وقد أخذ أرسطو فيما بعد نظرية أودوكس هذه وأضاف إليها أن هذه الكرات شفافة وتدور بسرعة ثابتة.

أ ـ تدور **الكرة الأولى** في كل التنظيمات من الشرق إلى الغرب، وتساوي مدة دورانها مدة دوران الكرة الثابتة. ومن خلالها يشارك كل جرم سماوي بالدوران النهاري.

ب ـ تدور **الكرة الثانية**، في كل هذه التنظيمات، من الغرب إلى الشرق، حول محور متعامد مع دائرة البروج. ولكن مدة الدوران ليست نفسها بالنسبة للمجميع، إذ إن هذه المدة تساوي، بالنسبة لكل كوكب، المدة التي يستغرقها هذا الكوكب لاجتياز دائرة البروج. إن حركة الثوابت لا تتطلب سوى كرة واحدة، في حين أن حركة كلٍّ من الشمس والقمر تتطلب كل واحدة منها ثلاث كرات، وحركات الكواكب تتطلب أربع كرات. مما يعطي مجموعاً من 27 كرة!

وكدليل محتمل على تطورات الأرصاد، نجد أن كاليب (Callippe)، تلميذ أودوكس، قد حسّن هذا النظام عبر إضافة كرتين لإنقاذ حركات القمر والشمس، وكرة لإنقاذ حركات الكواكب، باستثناء المشتري وزحل. وبالنتيجة رفع عدد الكرات إلى 34 كرة. وتشكل **مخطوطة أودوكس** (*Papyrus d'Eudoxe*) التي تُظهر أن كاليب كان قد حدد طول الفصول بدقة أكبر من أسلافه، دليلاً آخر على جودة الأرصاد في أيام كاليب. وستدفعه المقاييس التي وجدها (94 و92 و89 و90 يوماً، بدءاً من الاعتدال الربيعي) إلى التفكير بأن دورة ميتون طويلة بعض الشيء، وإلى جمع أربع فترات من تسع عشرة سنة في دورة من ست وسبعين سنة يكفي حذف يوم في نهاية كل منها. وهكذا، فإن كاليب رد طول السنة إلى قدر أكثر دقة، وغدت دورته المرجع الشائع لعلماء فلك العصور التالية. وهذه الدورة التي أعيد تنظيمها كانت تستعمل دائماً لتأريخ الأحداث الفلكية في عهد هيبارخوس. ويجب انتظار بطليموس لكي يتم اعتماد سنة المصريين الثابتة.

III. نظرية الكواكب

1. مقدمة

إن تاريخ نظرية حركات الكواكب قبل بطليموس غير معروفة بشكل جيد. بيد أنه انطلاقاً من نظرية الكواكب كما نعرفها اليوم وانطلاقاً من المبادئ التي ورثناها عن أفلاطون وأرسطو(*) (Aristote) والتي نعلم أنها كانت تُفرض نوعاً ما على الأقدمين لإنقاذ ظواهر حركات الكواكب، يمكننا البحث عما كان عليه تطور نظرية الكواكب حتى المرحلة التي تم فيها إدخال نقطة التساوي(**).

كان نظام أودوكس وكاليب للكرات المشتركة المركز يعرض الكواكب وهي تتحرك على مسافات ثابتة من الأرض. لكن ظاهراً واحداً على الأقل لم يتم إنقاذه، وهو التغيرات في اللمعان التي كشفت عنها أرصاد الكواكب، وبالأخص في حالة كوكب المريخ. ولكنه لم يكن من المعقول اعتبار هذه التغيرات في اللمعان باطنية، إذ وفقاً للمبدأ الأرسطي، لا شيء وراء المدار القمري يمكنه أن يتغير في السماء. وبالنتيجة، فقد وجب نسب هذه التغيرات سريعاً إلى تغير المسافات، والتخلي عن الكرات المشتركة المركز مع الأرض. وقد

(*) أرسطو (384 - 322 ق. م.): فيلسوف يوناني من أهم تلامذة أفلاطون ومن كبار مفكري البشرية، أطلق عليه لقب أمير الفلاسفة «Le Prince des philosophes». كان مربيّ الاسكندر الكبير وهو مؤسس مذهب فلسفة المشائين «La Philosophie péripatéticienne». له العديد من المؤلفات في المنطق والسياسة والطبيعيات والفيزياء والأخلاق، ومن بينها: السياسة (*Politique*) والخطابة (*Rhétorique*) والنفس (*Traité de l'âme*)... إلخ. ويعتبر أرسطو، في علم الفلك، أن الكون مدوّر ومحدود، وتقع الأرض في مركزه. كما يعتبر أن المنطقة المركزية للكون تتألف من أربعة عناصر هي: الأرض والهواء والنار والماء.

(**) نقطة التساوي هي النقطة التي يدور حولها بسرعة ثابتة مركز فلك تدوير كوكب. وبطليموس هو أول من أدخل هذه النقطة في مؤلّفه المجسطي، وذلك لتفسير ظاهرة تغيّر المسافات بين بعض الكواكب والأرض.

سيطر ثلاثة علماء في هذه المرحلة الطويلة التي تمتد أربعة قرون تقريباً وهم: أبولونيوس (Appolonius) وهيبارخوس وبطليموس.

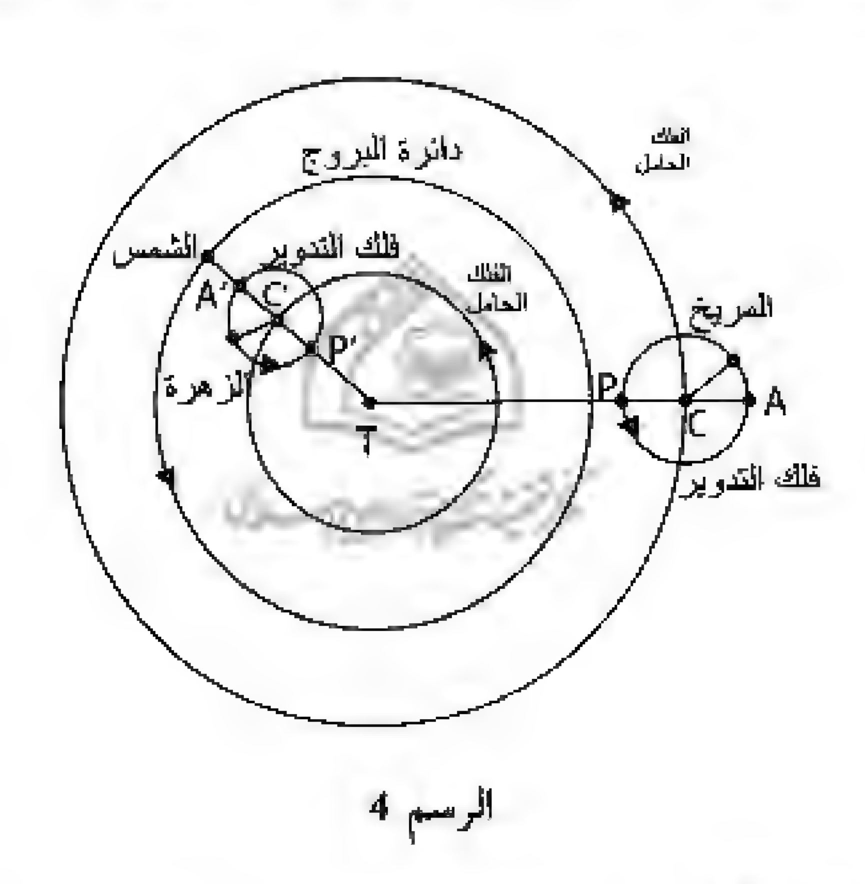
قبل أن نحاول متابعة مسارات تعقيد الأنظمة الأولية، يجب أن نذكر في بادئ الأمر أن الأقدمين كانوا يسمون تفاوتاً أو شذوذاً في حركة جرم سماوي كل انحراف يتم بسرعة منتظمة. وتعكس هذه المصطلحات إذاً الأحكام الفلسفية المسبقة حول بدايات علم الفلك اليوناني. وهي متصلة أيضاً بمنهجية علماء الفلك الذين حسبوا أولاً الموقع المتوسط لجرم سماوي يتنقل بانتظام على تربيع النجوم الثابتة، ثم أضافوا أو طرحوا تصحيحاً واحداً أو عدة تصحيحات صغيرة ـ المعادلات ـ تقيس التفاوت بين الموقع المتوسط والموقع الحقيقي. إذا كانت الكواكب تُظهر تفاوتين مختلفين، فإن الشمس لا تظهر سوى تفاوت واحد هو التفاوت البروجي، وقد سُمي كذلك لأن الشمس تظهر وكأنها تتنقل بسرعات متفاوتة حسب صور البروج التي تجتازها. والتفاوت في طول الفصول هو الدليل على التباينات في سرعة الشمس.

2. أبولونيوس

لا نعرف شيئاً تقريباً عن أبولونيوس الذي ولد في بيرغ (Perge) وكان ناشطاً في الإسكندرية حوالى العام 230 ق.م.، وإذ ظل مشهوراً كعالم رياضيات عبر دراسته للقطع المخروطية، فإننا لا نعرف عنه كعالم فلك سوى ما ينقله لنا بطليموس الذي أخذه بدوره عن هيبارخوس. في الكتاب الثاني عشر من **المجسطي** (*Almageste*)، يُدخل بطليموس نظرية تراجع الكواكب كالآتي: «لمعالجة هذه المشكلة، قام الهندسيون، ومن بينهم أبولونيوس بيرغ، بدراسة أحد التفاوتين، ذلك الذي يتعلق بالشمس. وإذا عرضنا هذا التفاوت

بواسطة فلك التدوير، يجب أن يتحرك هذا الأخير بالطول وفقاً لترتيب الصور [أي من الغرب إلى الشرق] على دائرة مشتركة المركز مع فلك البروج، في حين يحرك فلك التدوير الجرمَ بسرعة تساوي سرعة التفاوت وبحركة مباشرة على جزء فلك التدوير الأكثر بعداً عن الأرض».

وهكذا فإن أبولونيوس كان يعرف نظام فلك التدوير. ما هو نظام فلك التدوير؟ لنأخذ حالة كوكب علوي، ولننظر إلى الرسم 4.



الرسم 4

توجد الأرض في T، وسط دائرة تسمى الفلك الحامل. يدور المركز C لفلك التدوير على الفلك الحامل (حركة على خطوط الطول) وحول الأرض خلال دورة يكون فيها الكوكب قد قام بدورة في السماء، أي بدورانه النجمي (المريخ، 687 يوماً؛ المشتري، 11,9 سنة؛ زحل، 29,5 سنة). ويجتاز الكوكب في هذه الأثناء فلك تدويره (حركة متفاوتة) بالاتجاه عينه، وخلال مدة دورانٍ يُدعى

بالاقتراني (Synodique)، وذلك خلال الفترة التي تفصل بين مقابلة الكوكب مع الشمس والمقابلة التي تليها. وهذا لأنه كان من عادة الأقدمين إعادة الحركة المتفاوتة إلى الأوج دائماً، أي إلى الخط TA، الذي يدور حول T (المريخ، 779,9 يوماً؛ المشتري، 338,9 يوماً؛ زحل، 378,1 يوماً). أما في أيامنا هذه، وبما أننا نعيد الحركة المتفاوتة إلى نصف قطر يتحرك بشكل متوازٍ لاتجاه أصلي، فإنه يتم اجتياز فلك التدوير خلال سنة نجمية. وإذا أسمينا T الدوران النجمي للأرض، وT' الدوران النجمي لكوكب، وS دورانه الاقتراني، نحصل على المعادلة التالية:

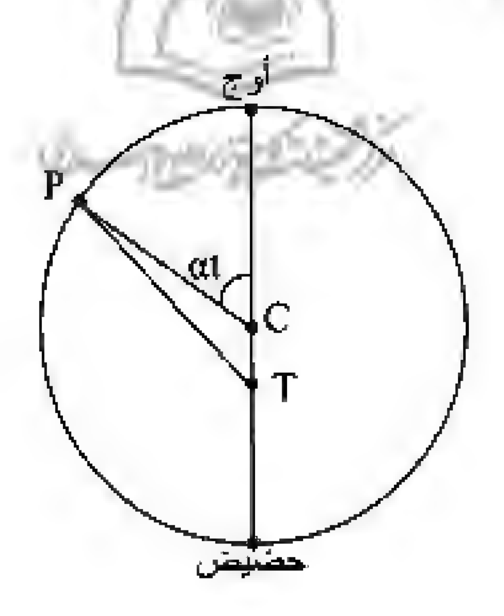
$$1/S = 1/T - 1/T'$$

ويختلف النموذج بعض الشيء بالنسبة لعطارد والزهرة. فمدة الحركة على الفلك الحامل تساوي سنة (الخط TC' يتجه دائماً نحو الشمس)، في حين أن حركة الكوكب على فلك التدوير تستغرق ما نسميه المدة النجمية (عطارد، 88 يوماً؛ الزهرة 225 يوماً). وهنا أيضاً يجدر بنا الإشارة إلى أن الأقدمين كانوا يعدّون الحركة على فلك التدوير بدءاً من النقطة P' على نصف القطر TC'، وأن مدة دوران هذين الكوكبين على فلك التدوير كانت بالنتيجة تحدث خلال مدتهما الاقترانية (عطارد، 115,9 يوماً؛ الزهرة، 583,9 يوماً).

ويجدر بنا الإشارة إلى أنه من الممكن أيضاً أن نعرض، عن طريق فلك التدوير، حركة جرم يتنقل، كالقمر أو الشمس، بسرعة متغيرة لكن من دون أن يتوقف أو يتقهقر. وفي هذه الحال تكون الحركة على فلك التدوير في الاتجاه المعاكس للحركة على الفلك الحامل.

لنعد إلى بطليموس الذي يضيف: «إذا افترضنا، بطريقة أخرى، أن الشذوذ المتعلق بالشمس يَنتُج عن طريق فلك خارج المركز لا يمكن استعماله سوى لثلاثة كواكب تشكّل أي زاوية كانت بالنسبة إلى الشمس (المريخ والمشتري وزحل)، فإن مركز هذا الفلك يدور بسرعة تساوي السرعة الظاهرة للشمس في دورانها حول مركز دائرة البروج حسب تسلسل الصور (من الغرب إلى الشرق)، في حين أن الجرم السماوي يتحرك على الفلك الحامل في الاتجاه المعاكس في مدة تساوي مدة التباين».

ومن المحتمل فعلاً أن يكون أبولونيوس هو الذي اخترع الفلك الخارج المركز: وهو فلك ثابت في حالة حركة الشمس، أو متحرك في حالة الكواكب. ولنلقِ نظرة على حالة الفلك الخارج المركز الثابت (انظر الرسم 5).



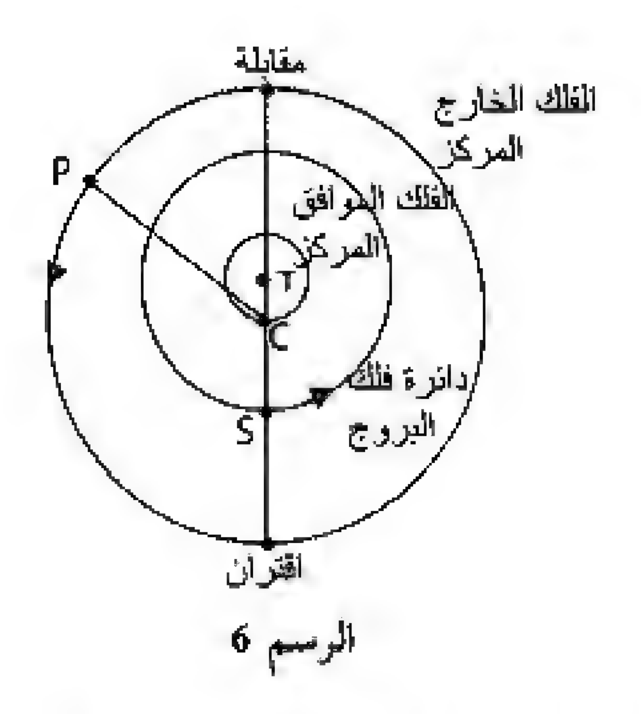
الرسم 5

لنفرض دائرة ذات مركز C، ولنفرض T نقطة موجودة داخل الدائرة ولكن مختلفة عن المركز C. P هي نقطة ما موجودة على محيط الدائرة وهي تمثل كوكباً. لنجعل الدائرة تدور بحركة منتظمة

حول مركزها C. من الواضح أنه إذا راقبنا حركة الكوكب من النقطة T، فإن مسافة الكوكب وسرعته تبدوان وكأنهما تتغيران. إن حركة الكوكب الحقيقية منتظمة بالفعل بالنسبة لمركز الدائرة، ولكن راصداً أرضياً موجوداً على النقطة T لا يشغل للأسف المكان المميز في الكون الذي يمكّنه من التمتع بذلك مباشرة. وهذا الأمر يخلق موقفاً محيراً في عالم مركز بكل معنى الكلمة حول الإنسان. ولكنه في النهاية ابتعاد قليل الأهمية عن المبادئ: إذا لم تكن الأرض في المركز الهندسي للكون، فإنه يمكننا على الأقل التأكيد بأنها تتصدر وسطه.

غير أن الكواكب تُظهر، بالإضافة إلى التفاوت البروجي، تفاوتاً آخر يُنتج ظاهرة التوقفات والتقهقرات التي أكسبتها اسم الكواكب السيارة. بيد أن الكوكب لا يتقهقر دائماً عند النقطة نفسها من فلك البروج، وهذا يعني أن هذا التفاوت لا يتعلق بموقع الكواكب بالنسبة إلى النجوم وإنما بموقعها بالنسبة إلى الشمس. وهكذا لاحظ الأقدمون أن الكواكب العلوية، المريخ والمشتري وزحل، تصل إلى وسط قوس تقهقرها عندما تكون مقابلة للشمس، وأنهم يستطيعون المحافظة على هذا التفاوت الثاني، أي التفاوت بالنسبة إلى الشمس، بفضل فلك خارج المركز متحرك.

لنأخذ على سبيل المثال حالة كوكب المريخ الذي كانت تغيرات لمعانه معروفة جداً. يكون هذا الكوكب في أقصى لمعانه عندما يمر بخط الزوال عند منتصف الليل، أي عندما يكون في مقابلة مع الشمس. يجب إذاً وضع مركز الفلك الخارج المركز P، الذي يرسمه المريخ على الخط الأرض ـ الشمس TS، في نقطة C غير معروفة مسبقاً (انظر الرسم 6).



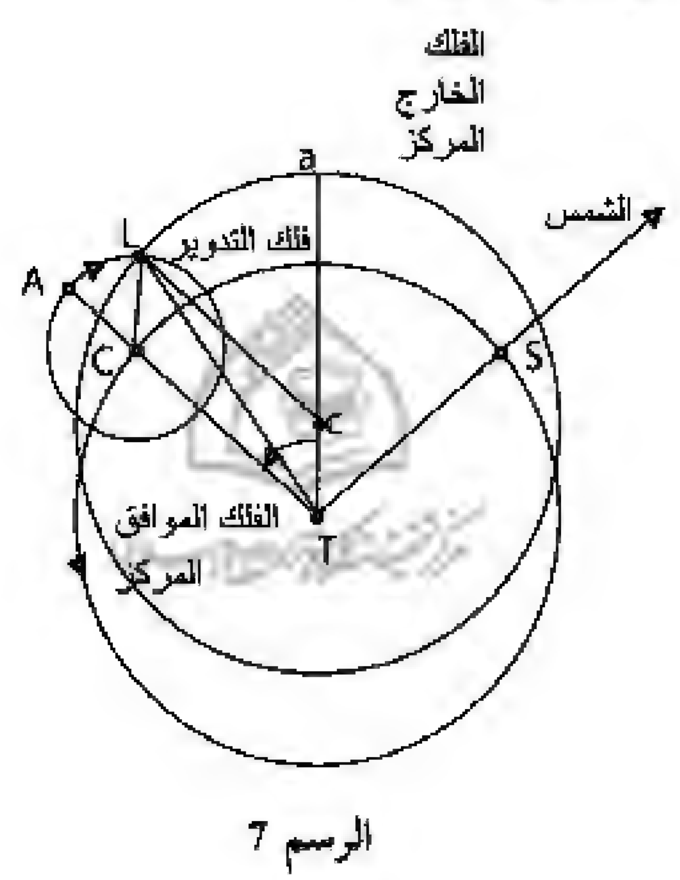
الرسم 6

غير أن الخط TS غير ثابت إذ أنه يقطع خلال سنة مستوي دائرة البروج. وبالنتيجة، فإن المركز C للفلك الخارج المركز الذي يقطعه المريخ يجب أن يدور حول الأرض خلال سنة. أما المريخ فإنه يقطع الفلك الخارج المركز في الوقت الذي يفصل بين مقابلتين متتاليتين، أي خلال مدة اقترانية (Période Synodique) من سنتين وخمسين يوماً.

إذاً، كان لدى علماء الفلك في عصر أبولونيوس نظامان هندسيان متنافسان لعرض حركة الكواكب العلوية، إضافة إلى أنهم كانوا يعرفون معادلتهما كذلك. لننظر إلى الرسم 7.

إن الحركة الظاهرة للكوكب L، إذا تمت رؤيتها من الأرض T، هي نفسها في حال الفلك الخارج المركز وفي حال فلك التدوير، على أن يكون نصف قطر فلك التدوير يساوي الانحراف عن المركز ($CL = Tc$) وعلى أن تكون القيم المطلقة للتباينات متساوية ولكنها تزداد باتجاه معاكس ($ACL = - aTC$)، إذ تُحسب هذه التفاوتات ابتداءً من النقطتين a أو A حسب النظام المختار. وإذا تم اعتماد الأوج كبداية، تكون الحركة المتوسطة هي الفارق بين

حركة الكوكب الشمسية المركز وحركة الشمس المتوسطة. وفي حال الكواكب العلوية تكون حركة الشمس المتوسطة أكبر من حركة الكوكب الشمسية المركز. يجب بالنتيجة أن تكون حركة الكوكب باتجاه معاكس لحركة مركز الفلك الخارج المركز بحيث تساوي الحركةُ المتوسطة حركة الشمس ناقص حركة الكوكب الشمسية المركز. ولكنّ هاتين الحركتين تكونان في نفس الاتجاه للكواكب الخمسة في نظرية فلك التدوير.



الرسم 7

بدءاً من ذلك العصر، أصبح باستطاعة علماء الفلك الاختيار بين أحد هذين النظامين. وليس من الصعب فهم سبب التخلي تدريجياً عن نظام الفلك الخارج المركز لصالح نظام فلك التدوير. فلهذا النظام الأخير ميزة شرح التوقفات والتقهقرات بطريقة أكثر بساطة. ثم إن الفلك الخارج المركز المتحرك لم يكن بالإمكان تطبيقه إلاّ على الكواكب العلوية، في حين أنه يمكن تطبيق فلك التدوير

على الكواكب الخارجية كما الداخلية. عند اعتماد نظام فلك التدوير، تحصل نظرية الكواكب على طابع أكثر تجانساً، لا بد وأنه استهوى علماء الفلك اليونانيين.

3. هيبارخوس

افتتح هيبارخوس المرحلة الكبرى لعلم الفلك الهندسي اليوناني متوّجاً باكتشاف مبادرة الاعتدالين، هذا السير البطيء التقهقري الذي يجعل عُقَد المدار الأرضي تنزلق على طول دائرة البروج. وسيشكل كتاب **المجسطي** لبطليموس التتويج والخلاصة لهذه المرحلة. التأكيدات الوحيدة التي نملكها عن سيرة حياة هيبارخوس هي مكان ولادته، نيقيا (Nicée) في بيثينيا (Bithynie) في شمال غربي آسيا الصغرى، ومرحلة عمله الفلكي: إن أول عملية رصد يمكن أن ننسبها من دون شك إلى هيبارخوس هي رصد الاعتدال الخريفي في 26 أيلول/ سبتمبر عام 146 ق. م. أما عملية رصده الأخيرة فإنها رصد موقع القمر في 7 تموز/ يوليو عام 126 ق. م.، ونعرف تفاصيل نظرياته الفلكية عبر بطليموس الذي لم يخفِ أبداً ما يَدينه لسلفه الشهير. والواقع أن هيبارخوس نفسه يَدين بالنماذج الهندسية التي هي أساس نظرياته إلى أبولونيوس الذي سبقه بخمس وسبعين سنة. ولكن هيبارخوس يضيف، من أجل تحديد المتغيرات الوسطية التحتية لكل من هذه النماذج، انتباهاً واهتماماً خاصّين في استخدام الأرصاد سواء قام بها بنفسه أو استقاها من الوثائق.

يُسلّم هيبارخوس، من أجل نظريته عن الشمس، أن الجرم النهاري لا يبدي سوى شذوذ بسيط واحد. وهذا يعني بالتعابير الهندسية أنه يمكن أن يتخذ نموذجاً له إما فلكاً خارج المركز ذا أوج ثابت، وإما فلكاً حاملاً ذا فلك تدوير واحد. ولبناء نظريته، هو الذي

يعرف سنة كاليب المدارية (365,25 يوماً)، وجب عليه تحديد طول الفصول الأربعة ـ وقد وجد أنها تبلغ أربعة وتسعين يوماً ونصف اليوم، واثنين وتسعين يوماً ونصف اليوم، وثمانية وثمانين يوماً وثمن اليوم، وتسعين يوماً وثمن اليوم. وانطلاقاً من هنا، حدد هيبارخوس الانحراف عن المركز، 24/1، وموقع الأوج، 5° 30′، في برج الجوزاء.

إن وضع نظرية للقمر تشكل مهمة أصعب بكثير من وضع نظرية للشمس. إن معرفة الشهر الاقتراني، وهو الفترة الزمنية التي تعيد الأوجه نفسها، أي المواقع نفسها بالنسبة إلى الشمس، يجب أن تضاف إليها معرفة الشهر غير القياسي، وهو الفترة الزمنية التي تفصل عودة القمر إلى السرعة نفسها، ومعرفة الشهر التنيني، وهو الفترة الزمنية التي تعيد القمر إلى العقدة الصاعدة من مداره أو إلى خط العرض نفسه، والأمر سيان. وحسب هيبارخوس فإنه يوجد، في مئة وستة وعشرين ألفاً وسبعة أيام وساعة، أربعةُ آلاف ومئتان وسبعة وستون شهراً اقترانياً، وأربعة آلاف وخمسمئة وثلاثة وسبعون شهراً غير قياسي، وأربعة آلاف وستمئة واثنا عشر شهراً نجمياً إلاّ 7° 30′. وحدد، إضافة إلى ذلك، أن خمسة آلاف وأربعمئة وثمانية وخمسين شهراً اقترانياً تساوي خمسة آلاف وتسعمئة وثلاثة وعشرين شهراً تنينياً. وإذا قارنّا هذه المقاييس بالمقاييس المعتمدة في أيامنا هذه تتوضح نوعية عمل هيبارخوس: وبالنسبة للشهر الاقتراني مثلاً، وجد هيبارخوس أنه يساوي تسعة وعشرين يوماً واثنتي عشرة ساعة وأربعاً وأربعين دقيقة وأربعاً وعشرين ثانية مقابل تسعة وعشرين يوماً واثنتي عشرة ساعة وأربع وأربعين دقيقة و2,8 ثانية في المقياس الحالي.

ولكن الاكتشاف الذي ظل متعلقاً باسم هيبارخوس، هو اكتشاف مبادرة الاعتدالين. ترتفع النقاط الاعتدالية كل سنة على دائرة

البروج لملاقاة الشمس. وينتج عن هذا الانزلاق أثران يمكن رصدهما، وهما تغير خطوط الطول للنجوم بحوالى خمسين ثانية قوسية في السنة، وفارق الطول بين السنة النجمية والسنة المدارية، وهو يساوي حوالى عشرين دقيقة من الوقت. واستطاع هيبارخوس، عن طريق هذه المقاربة المزدوجة، أن يجد حقيقة مبادرة الاعتدالين وأن يحدد قيمتها. ومن المحتمل، كما كان يعتقد بطليموس نفسه، أن الأثر الأول، وهو بسيط ولكنه يتمتع بمفعول التراكم عبر الزمن، هو الذي جعل هيبارخوس يوجه تفكيره في هذا الاتجاه.

كتب بطليموس في مقدمة جدوله الذي يتضمن 1022 نجماً: «لمّا كنّا نعتبر أن النجوم تحافظ على المسافات نفسها والهيئة نفسها، فإنه من الجيد أن نعرف مسبقاً أننا على حقّ بتسميتها بالثابتة؛ ولكن، إذا أخذنا بعين الاعتبار الحركة التي تجرف، وفقاً لتسلسل صور الأبراج، الكرة التي يبدو أن هذه الصور معلقة بها، فلن نجد أن تسمية الثابتة هذه تلائم النجوم. وبالفعل، نجد أن كلاً من هذين التأكيدين مثبت عبر كل ما جرى خلال كل الزمن الذي مضى حتى اليوم، منذ هيبارخوس الذي كان أول من فكر في هاتين الحقيقتين وذلك بناءً على ما كان لديه من أرصاد». ثم يعلمنا بطليموس بأن هيبارخوس صاغ في البداية فرضية أن كل النجوم الثابتة تتحرك بالنسبة للنقاط الاعتدالية، وأنه أكد هذه الفرضية بطريقتين: **أولاً**، قام بمقارنةٍ بين مسافة نجم السماك الأعزل (Spica)، سنبلة العذراء (L'Epi de la Vierge)، أي ألفا العذراء (alpha virginis)، خلال الاعتدال الخريفي في زمن أرصاد تيموخاريس (Timocharis)، بين العامين 293 و282 ق. م.، وبين هذه المسافة في عصره. واستنتج من هذه المقارنة أن خط طول السماك الأعزل كان قد ازداد درجتين في المئة وستين سنة التي كانت تفصله عن تيموخاريس.

ثانياً، حاول هيبارخوس تأكيد مبادرة الاعتدالين بدءاً من طول السنة. في الفصل الأول من الكتاب الثالث المكرّس لحركة الشمس، كتب بطليموس: «إن أول بحث يجب القيام به في نظرية الشمس هو البحث عن طول السنة. نحن نطّلع، عبر مؤلفات الأقدمين، على آرائهم المختلفة وشكوكهم في هذا الموضوع، وخاصة على آراء وشكوك هيبارخوس الذي، من شدة حبه للحقيقة، لم يوفر بحثاً أو عملاً لإيجادها. وأكثر ما يدهشه هو أنه عند مقارنة عودات الشمس إلى النقاط المدارية والاعتدالية، يبدو له وكأن السنة لا تتضمن تماماً ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً وربع اليوم، وأنه عندما يقارن العودات إلى النجوم الثابتة نفسها، يجد أن السنة أطول. ومن هنا تكهّن أن لدى كرة النجوم الثابتة حركة بطيئة ما، تجعلها تقطع نقاط السماء المتتالية وتكون، كما حركة الكواكب، في الاتجاه المعاكس للحركة الأولى التي تدفع السماء بأكملها».

وهكذا، فإن هيبارخوس قام، من أجل تحديد طول السنة، بمقارنة الأرصاد التي تمت بين العام 162 ق. م. و128 ق. م. غير أن المقاييس التي حددها كانت تبدو وكأنها تشير إلى أن طول السنة المدارية كان متغيراً، كما لو أن النقاط الاعتدالية كانت تتحرك بسرعات متفاوتة حسب السنين. لكن هيبارخوس اكتفى بمقارنة الانقلاب الذي قام برصده بنفسه عام 134 ق.م. فقط مع الانقلابات التي قام برصدها أريسطرخوس (Aristarque) في العام 279 ق.م. وميتون في العام 431 ق.م. واستنتج منها أن النقاط الاعتدالية تتحرك جزءاً من مئة من الدرجة في السنة، وأن طول السنة المدارية تساوي ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً وربع اليوم ناقص ثلاثة أجزاء من مئة من اليوم، وأن السنة النجمية بالنتيجة تساوي ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً وربع اليوم زائد جزء من مئة وأربع وأربعين من اليوم. إن هذه

المقاييس تمتاز بدقتها. وهي تساوي ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً وخمس ساعات وخمساً وخمسين دقيقة واثنتي عشرة ثانية للسنة المدارية، مقابل المقياس المعاصر الذي يساوي ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً وخمس ساعات وثمانياً وأربعين دقيقة وستاً وأربعين ثانية. أما بالنسبة للسنة النجمية، فهي تساوي عنده ثلاثمئة وخمسة وستين يوماً وست ساعات وعشر دقائق، ويقابلها في المقياس المعاصر ثلاثمئة وخمسة وستون يوماً وست ساعات وتسع دقائق وتسع ثوان وأربعة وسبعون جزءاً من مئة من الثانية.

IV. بطليموس

1. خلاصة علم الفلك القديم

لا نعرف شيئاً تقريباً عن حياة كلوديوس بطليموس (Claude Ptolémée)، لا عن تاريخ أو مكان ولادته، ولا عن تاريخ وفاته. ولكن، يمكننا أن نحدد فترة عمله بفضل الأرصاد التي يذكر أنه قام بها بنفسه بين العامين 127 و143. وكتابه **الأطروحة الرياضية** (*Syntaxe mathématique*) الذي نقله العرب تحت عنوان **المجسطي** هو أكثر مؤلفاته الفلكية شهرة، ولكننا نجد ملخصاً لمعطيات **المجسطي** العددية في **فرضيات الكواكب** (*Hypothèses des planètes*).

لا يبدو أن علم الفلك قد أحرز تطورات كبيرة في السنوات المئتين والستين التي تفصل هيبارخوس عن بطليموس، لولا أعمال بوزيدونيوس (Posidonius). فالأرصاد الوحيدة التي يتذكرها بطليموس من هذه الفترة هي رصد احتجاب نجوم الثريا(*) (Les

(*) هي عنقود نجمي مفتوح يقع في كوكبة الثور فوق كتف الجبار اليمنى. وهي تُعرف أيضاً باسم «بنات نعش» أو «الشقيقات السبع».

Pléiades) الذي قام به أغريبا (Agrippa de Bithynie) في عام 92، ورصد احتجاب نجم السنبلة والنجم بيتا العقرب (β Scorpion) الذي قام به منيلاوس (Menelaus) في روما عام 98.

يستعرض بطليموس، في بداية كتابه الأول، فرضياته الأساسية لعلم الكون. السماء الكروية تدور حول محور ثابت: هذا ما يظهر من خلال الحركة الدائرية للنجوم المحيطة بالقطب ومن واقع أن النجوم الأخرى تسطع وتغيب في النقاط نفسها من الأفق. الأرض موجودة في وسط السماوات، وإن لم يكن الوضع كذلك لظهرت النجوم أقرب إلينا في جهة من السماء عنها من الجهة الأخرى. ولو كانت الأرض أقرب إلى قطب أكثر من الآخر، وهي موجودة على المحور، لما كان الأفق هو الذي يقسم خط الاستواء إلى قسمين متساويين، بل إحدى خطوط العرض. إن الأرض كروية ولكنها كالنقطة مقارنة بالكرة السماوية، إذ إن النجوم، إذا تم رصدها من أي مكان من الأرض، تظهر بالقدر(*) نفسه وتحافظ على المسافة نفسها بين بعضها البعض. ليس للأرض حركة انتقالية، إنها النقطة الثابتة التي تستند إليها حركات الأجرام السماوية، إنها النقطة التي تلتقي فيها الأجرام السماوية الثقيلة في الكون. وإذا كانت الأرض تتحرك، لكانت حركتها متناسبة مع حجمها الكبير ولكانت قذفت الأشياء والحيوانات في الهواء. ولذلك يجب أن نرفض دوران الأرض على نفسها. في هذه الأفكار عامة، كان بطليموس يختلف قليلاً عن الذين سبقوه.

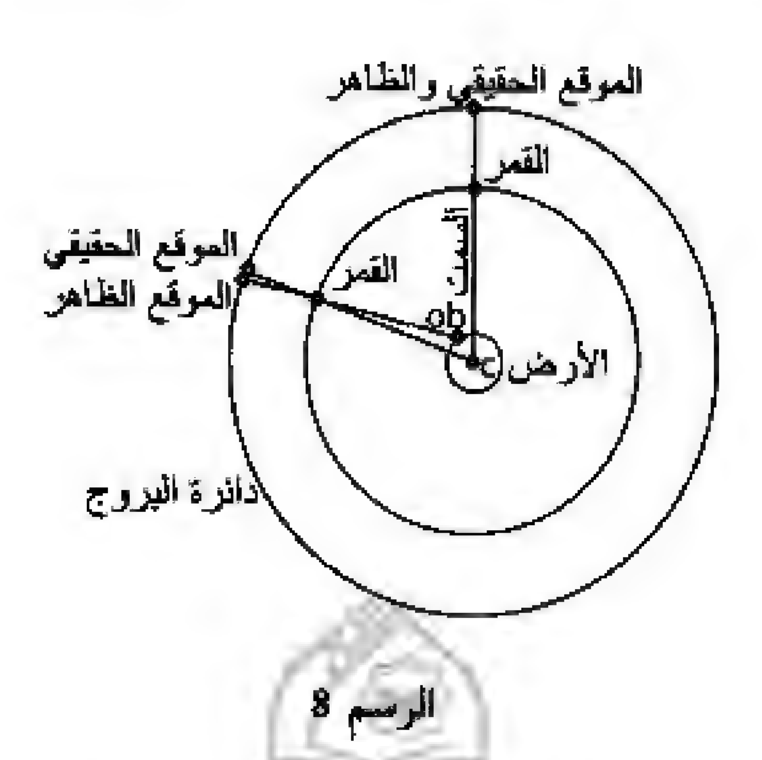
(*) القدْر هو قياس إضاءة جرم سماوي كما تتراءى للإنسان على الأرض. وأوّل من صنّف النجوم حسب قدرها هو هيبارخوس الذي قسّم النجوم إلى ست مراتب: وتكون النجوم الأكثر سطوعاً من القدر الأول، والتي تليها من القدر الثاني، وهكذا دواليك، حتى القدر السادس الذي يقيس إضاءة النجوم الأكثر خفوتاً التي تراها العين المجرّدة.

2. نظرية خطوط الطول

اكتفى بطليموس بنظرية هيبارخوس في ما يتعلق بحركة الشمس. وهذا أمر غريب، إذ إن الأخطاء الطفيفة في المقاييس الهيبركية بدأت بعد أكثر من ثلاثة قرون بقليل، تُنتج آثاراً يمكن رصدها. كان هيبارخوس قد بالغ في تقدير السنة المدارية، مما يعني أنه نسب إلى الشمس حركة متوسطية بطيئة جداً. بلغ الخطأ خلال ثلاثمئة عام 2/761′، يُضاف إليها خطأ أقصى من 22′ في معادلة المركز، سببه مقياس الانحراف عن المركز التي اعتمدها هيبارخوس. وهكذا فإن الخطأ في تقدير موقع الشمس ابتداءً من جداول بطليموس يمكن أن يبلغ حوالى 100′. ومن الغريب أن بطليموس لم يقم بأي محاولة للتأكد من دقة نظرية الشمس.

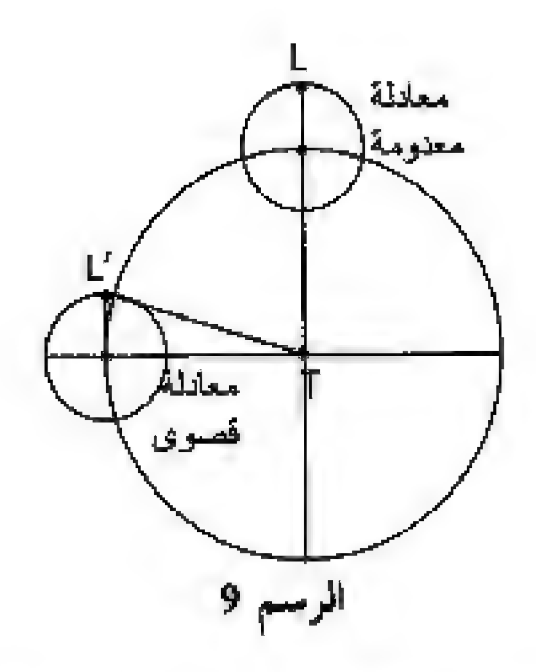
ولكننا ندين لبطليموس بتطورات كبيرة في نظرية القمر. وهذه النظرية تحتل مكاناً مهماً في تاريخ علم الفلك القديم. إنها في البداية مستقلة عن علم الكون المتبع: أقر علماء الفلك في كل العصور أن القمر يدور حول الأرض، وبالنتيجة، فإن كون الأرض ثابتة أم متحركة لا يغير شيئاً في نظرية حركة القمر. ثم إن هذه الحركة هي في غاية التعقيد، إضافة إلى أنه يصعب تحديد الموقع الحقيقي للقمر: فنصف قطر مدار القمر ليس غير متكافئ مع نصف قطر الكرة الأرضية، وينتج عن ذلك أن الخطوط المرسومة من وسط الأرض ومن عين الراصد إلى القمر تشكل زاوية دقيقة، وأن هذه الخطوط، عندما نمدها حتى دائرة البروج، تصل بالضرورة إلى نقاط مختلفة، أحدها هو الموقع الحقيقي للقمر والآخر هو موقعه الظاهري، مشكلاً ما نسميه اختلاف المنظر النهاري (لكن يجب استثناء الحالة التي يمر فيها القمر عند سمت الرأس، إذ يكون اختلاف المنظر عندها معدوماً) (انظر الرسم 8). ولحسن الحظ فإن

رصد خسوفات القمر يحدد الموقع الحقيقي للقمر مباشرةً، شرط معرفة حساب موقع الشمس الذي يختلف عنه حينها بـ 180°.



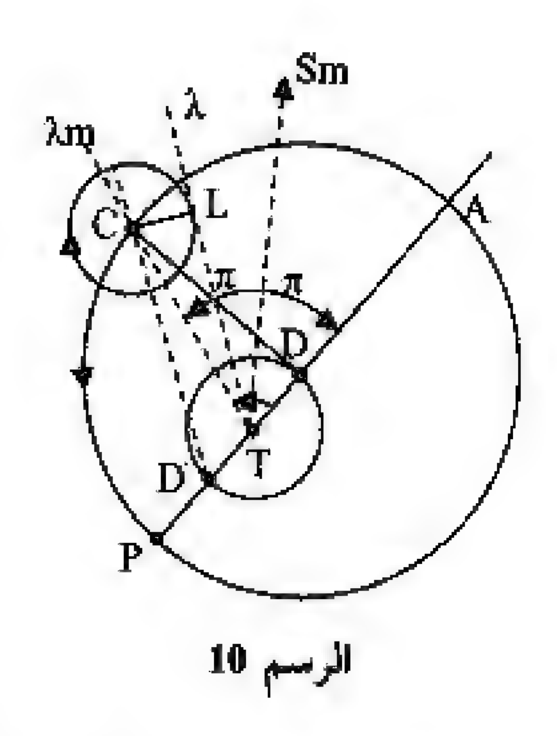
الرسم 8

استعمل هيبارخوس لنظريته عن القمر فلك تدوير بسيط يتحرك على فلك حامل مشترك المركز مع الأرض، أي أنه لم يكن يستطيع أن يعرض سوى التفاوت الأول في حركة القمر، وهو التفاوت الذي نسميه اليوم معادلة المركز، في حين كان اليونان يسمونه التفاوت الأول والبسيط. لكن بطليموس لاحظ اختلافات بين المواقع التي تم رصدها والمواقع التي استخلصت من نظرية هيبارخوس. وهذه الاختلافات التي تظهر خلال التراببع تختفي عند الاتصالات، كما أنها، إضافة إلى ذلك، لا تظهر خلال كل التراببع: إنها تختفي كلياً عندما يحصل التربيع ويكون القمر في حضيض فلك تدويره أو أوْجه، وهي تكون الأكبر، 2° 39′، عندما يحصل التربيع ويصل إلى الذروة التفاوتُ الأول، الشذوذُ أو معادلةُ المركز (انظر الرسم 9).



الرسم 9

وقد قادت هذه الملاحظة بطليموس إلى إدخال تفاوتٍ ثانٍ في حركة القمر، وهو التفاوت الدوري. من الانحرافات إلى الشذوذ، توصل بطليموس إلى عدة استنتاجات: إذا كان هذا التفاوت الثاني يتغير حسب مراحل القمر، يجب ربط حركة مركز فلك التدوير بحركة الشمس؛ إذا كان التفاوت الدوري في أقصاه عند الترابيع، يجب أن يكون المركز C لفلك التدوير في أوج الفلك الحامل P في ربع القمر الأول وربع القمر الأخير؛ وينتج عن ذلك أن المركز يجب أن يكون في الأوج A عند الاتصالات. ويستنتج بطليموس من ذلك أن المركز C لفلك التدوير يجب أن يتحرك على دائرة الفلك الحامل منحرف المركز، ولكن بحيث تكون السرعة الزاوية (Vitesse angulaire) منتظمة ليس بالنسبة إلى المركز (D) للدائرة، بل بالنسبة إلى الأرض (T)، وبحيث يقوم المركز C بدورتين خلال شهر اقتراني. ويسفر عن ذلك آلية معقدة يبرزها الرسم 10، حيث تحدد المقاطع TD، وDC، وCL موقع القمر L. تدور TD من الشرق إلى الغرب بسرعة ثابتة بالنسبة إلى الخط TS*m* (الذي يربط الأرض بالشمس المتوسطة). ويجتاز المركز D للفلك الحامل الدائرة الصغيرة ذات المركز T. ويدور نصف قطر الفلك الحامل DC حول D بسرعة غير ثابتة.



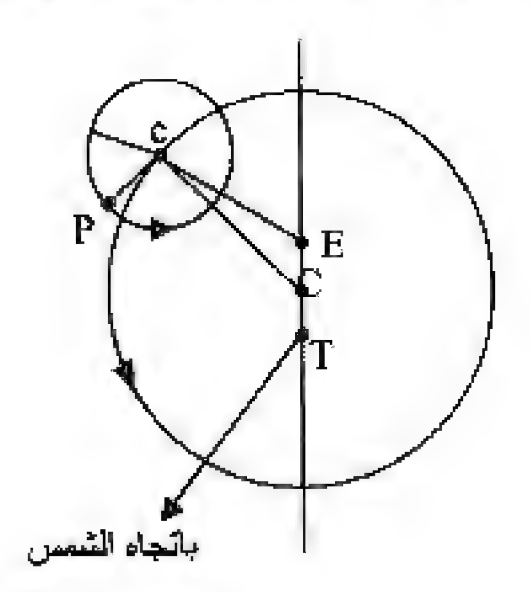
الرسم 10

إن الخط الذي يجمع المركز D بالأوج A للفلك الخارج المركز يدور حول الأرض باتجاه عكسي، والزاوية ATC التي يشكلها هذا الخط مع الخط الذي يذهب من الأرض إلى مركز فلك التدوير تساوي ضعف المسافة الزاوية بين القمر والشمس، وتصل إلى 180° في ربع القمر الأول وربع القمر الأخير. غير أن هذا التحسين في نظرية حركة القمر أسفرت عن نتيجة مدهشة. يتناقض بطليموس مع المبدأ الأساسي للحركة الدائرية المنتظمة: مع إدخال ما يُسمى بنقطة التساوي، تكون الحركة دائرية بالنسبة للنقطة D ولكنها منتظمة بالنسبة للنقطة T.

وهكذا قام بطليموس بخطوة كبيرة إلى الأمام باكتشاف التفاوت الثاني في حركة كرة القمر، وهو التفاوت الدوري، الذي حدد قيمته بـ 1° 19′ 30″، وهي قيمة قريبة جداً من القيمة الحقيقية. بيد أن الأرصاد اللاحقة أظهرت أن هذه النظرية كانت غير كافية وأنه لا يزال هنالك أخطاء. إذاً أعاد بطليموس النظر في المسألة، ولكنه لم يتمكن من اكتشاف التفاوت الثالث، وهو الانحراف، بل وضع فقط نظرية أكثر تعقيداً. وإذا كانت هذه النظرية تعرض بشكل أفضل بقليل

خطوط الطول القمرية، فإنها تولّد في قياس القطر الظاهري للقمر تفاوتات تتعارض مع الأرصاد الأقل إتقاناً. وينتج من هذه النظرية الأخيرة أن القمر، عندما يكون في الترابيع وفي الوقت نفسه في القسم الأسفل من فلك تدويره، يجب أن يكون قطره الظاهري ضعف قطره عندما يكون في الاتصالات، ويجب أن تظهر مساحة القمر نفسه أكبر بأربع مرات تقريباً.

حسّن بطليموس نظرية الكواكب أيضاً. فقد نقل، على غرار أبولونيوس، حركات الكواكب على مستوي دائرة البروج الذي يكون مستوي الفلك الحامل لكل من الكواكب مائلاً قليلاً بالنسبة إليه. ولكنه، لعرض الاختلاف البروجي، تخلى عن الأفلاك الحاملة المتحدة المركز مع الأرض لصالح الأفلاك الحاملة المختلفة المركز. إن فلك التدوير الذي يتحرك عليه الكوكب بانتظام يعرض الشذوذ، وبالنتيجة التوقفات والتقهقرات. الشعاع الذي يذهب من مركز فلك التدوير إلى الكوكب هو، بالنسبة للمريخ والمشتري وزحل، موازٍ للخط الذي يتجه نحو المكان المتوسط للشمس، في حين أن مركز فلك التدوير موجود على هذا الخط بالنسبة لعطارد والزهرة.



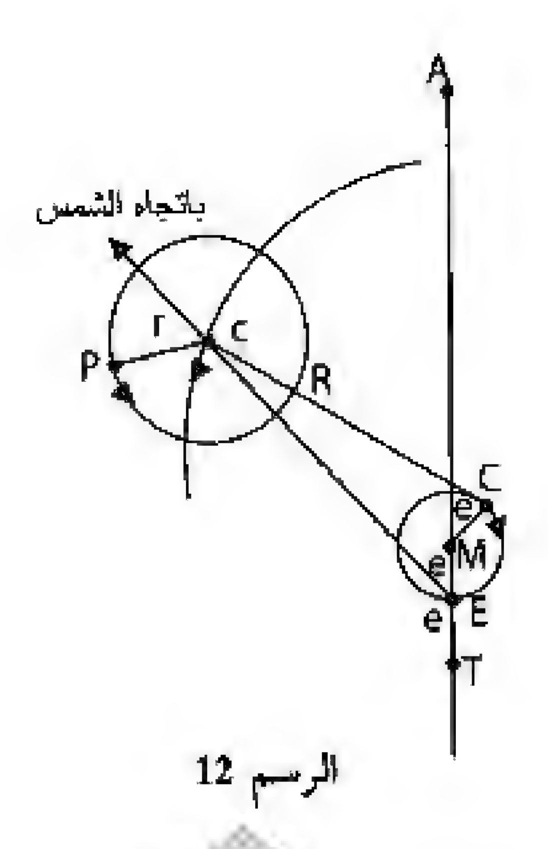
الرسم 11

ولكن، حتى بعد تصحيحها، لم تكن نظرية أبولونيوس مرضية: يبدو الفرق الأكبر بين الموضع المتوسط والموضع المرصود، أو بعبارات أخرى تبدو الزاوية التي يشكلها شعاع فلك التدوير عند رؤيته من الأرض، أكبر عند الأوج وأصغر عند الحضيض مما تتوقعه الحركة المنحرفة، ويجب أن يكون مركز المسافات أقرب إلى الأرض من مركز الحركة المنتظمة. وهذا ما دفع بطليموس إلى إدخال نقطة تساوٍ موجودة على خط القبا (ligne des absides)، كما فعل سابقاً في حالة حركة القمر. وتم اختيار موقع نقطة التساوي E بحيث يكون TC = CE، حيث T هي الأرض، وC هي مركز الفلك الحامل (وبالتالي مركز المسافات المتساوية)، وE هي نقطة التساوي أو مركز الحركة المنتظمة (انظر الرسم 11). والخط الذي يصل E بمركز فلك التدوير يقطع زوايا متساوية بأوقات متساوية.

غير أن هذا التعقيد لم يكن كافياً لعرض حركة عطارد. إن النظام الذي ابتكره بطليموس هو على نحو يكون فيه مركز حركته المنتظمة E موجوداً بين الأرض T ونقطة M يرسم حولها مركزُ الفلك الحامل C دائرةً صغيرة من الشرق إلى الغرب، في الوقت نفسه الذي يتطلبه مركز فلك التدوير ليدور حول الفلك الحامل (انظر الرسم 12). ولدينا المعادلة التالية:

$$TE = EM = MC = cC/20 = e$$

كل هذا النقاش يُبيّن محاسن استعمال النماذج التي ذكرناها في بداية الفصل.

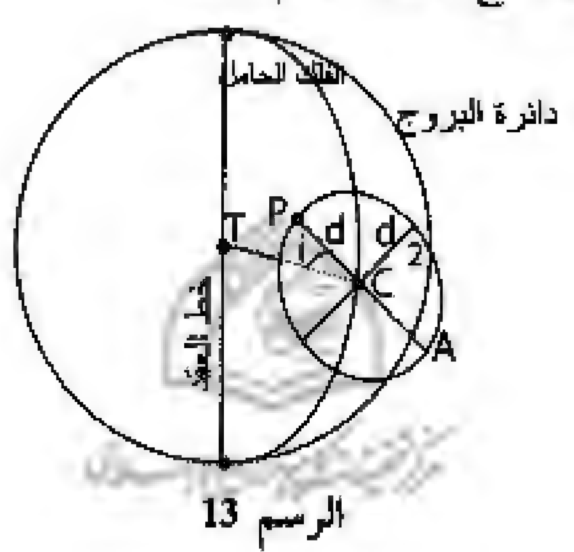


الرسم 12

3. نظرية خطوط العرض

إن الأفلاك الحاملة للكواكب قليلة الانحناء على دائرة البروج، وبالنتيجة يمكننا وضع نظرية خطوط العرض مستقلة عن نظرية خطوط الطول، فالتصحيحات التي يجب إدخالها على مقاييس هذه الأخيرة غير مهمة، ولكن يجب تقدير خطوط العرض نفسها. لنأخذ حالة الكواكب الخارجية. يُفترض أن يكون الفلك الحامل مائلاً على دائرة البروج بـ 1° بالنسبة للمريخ، وبـ 1° 30' بالنسبة للمشتري، وبـ 2° 30' بالنسبة لزحل. أما بالنسبة للمريخ، فإن خط قبا الفلك الحامل يتعامد مع خط العقَد، أي أنه يتطابق مع الخط الذي يجمع نقاط خط الطول الأكبر والأصغر شمالاً وجنوباً. وهذا الخط يقع على 20° إلى غرب خطوط العرض الكبرى بالنسبة للمشتري، وعلى 50° إلى شرق خطوط العرض الكبرى بالنسبة لزحل. وفي هذه الحالات الثلاث، تقع نقاط الأوج شمال دائرة البروج. في البداية، اعتبر بطليموس أن أفلاك التدوير كانت دائماً موازية لمستوي دائرة

البروج. وهذا أمر يمكن فهمه عندما نتذكر أنه لم يتم إدخال فلك تدوير كوكب خارجي إلاّ للتعبير عن الحركة السنوية للأرض حول الشمس التي نُقلت، في النظام الأرضي المركز، إلى هذا الكوكب. وظنّ بطليموس لاحقاً أنه من الضروري تغيير ميل أفلاك التدوير بالنسبة إلى دائرة البروج، على التوالي 2° 15′ للمريخ؛ 2° 30′ للمشتري، و4° 30′ لزحل. غير أن القطر d_2 لفلك التدوير المتعامد مع خط القيا كان يظل دائماً موازياً لمستوي دائرة البروج في حين كان القطر d_1 يتأرجح (انظر الرسم 13).



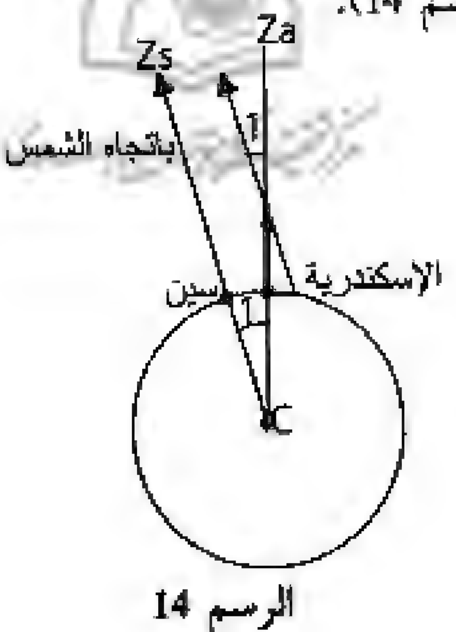
الرسم 13

إن النظام الذي يفرض فيه أن يعرض خطوط العرض معقد جداً. ويرتبط هذا التعقيد بواقع أن بطليموس جعل خطوط العقَد تمر بالأرض في حين أنها في الحقيقة تمر بالشمس. إضافة إلى ذلك، بما أن مدار الكواكب الداخلية محاط في الحقيقة كلياً بمدار الأرض، فإن النظام الذي يمثل حركاتها على خطوط العرض هو أكثر تعقيداً.

4. أبعاد العالم

إن الكون عند الأقدمين ذو حجم صغير. أما عند بطليموس فإن شعاع كرة النجوم الثابتة التي تسيّج العالم يساوي 20000 قطراً أرضياً، أي إنه يجب تحديد قدر قطر الأرض للعودة إلى المسافات

المطلقة. أول تقدير معروف لشعاع الأرض أعطاه أرسطو ويساوي 400000 غلوة؛ أما أرخميدس (Archimède) فقد قدّره بـ 300000 غلوة؛ من دون أن نملك أي معلومة حول الطريقة التي استعملوها في قياساتهم. ولكن مبدأ واحداً كان يطبق، وهو الذي استعمله إراتوستينس[*] (Eratosthène) حوالى العام 229 ق. م. فقد كان معروفاً في سين (Syène) في مصر (أسوان حالياً)، أن بئراً كانت تضاء حتى قعرها يوم الانقلاب الصيفي عند الظهر، أي أن الشمس تمر في هذا الوقت في سمت المدينة. وعند قياس ظل مسلة في الإسكندرية التي هي تقريباً، لحسن الحظ، على خط الزوال نفسه الذي توجد عليه سين، عند ظهر اليوم نفسه، وجد إراتوستينس المسافة الزاوية للشمس عند سمت الإسكندرية وتساوي واحد على سبعة وخمسين من الدائرة (7° 10′): وهذا هو فرق العرض بين المدينتين (انظر الرسم 14).



الرسم 14

غير أن المسافة المقاسة على الأرض بين هاتين المدينتين كانت

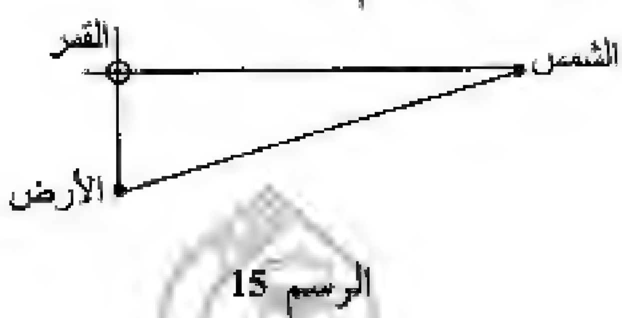
(*) إراتوستينس (~276 ـ ~194 ق.م.): هو عالم رياضيات وعالم فلك يوناني من مدرسة الإسكندرية، وهو أول من أعطى تقديراً دقيقاً لمحيط الأرض.

تساوي 5000 غلوة. وقياس محيط الأرض يساوي 50 مرة أكثر، أي 250000 غلوة. العودة بدءاً من هذه المعطية إلى قيمة كيلومترية يثير بضع مسائل. فبالإضافة إلى أن قيمة الـ 5000 غلوة كانت بكل وضوح مُدوّرةً، وكذلك الـ 7° 10'، حوّل إراتوستينس القيمة 250000 إلى 252000 وذلك لتسهيل الحساب (إن قسمة هذا العدد بـ 360 تعطي عندها 700 غلوة بكل درجة من خط الزوال). كما أنه من المستحيل معرفة قيمة الغلوة المستخدمة (فغلوة إراتوستينس المصرية كانت أقصر بقليل ـ ما ينيف على 150 متراً ـ من غلوة أرخميدس أو بطليموس اليونانية ـ أكثر من 200 متراً). لنقل أن محيط الأرض الذي تم تحديده بهذا الشكل كان يساوي أكثر بقليل من 40000 كلم (ويساوي الشعاع بالتالي 6370 كلم)، ولنشر إلى بساطة الطريقة التي ترتكز على التقدير، خطياً وزاوياً، للمسافة الواقعة بين نقطتين على خط الزوال نفسه، ثم على تحديد المحيط الكامل بمجرّد تطبيق القاعدة الثلاثية.

وبمعرفة قطر الأرض، يسهل تحديد قطر القمر. يعود المبدأ إلى أريسطرخوس، وتبعه هيبارخوس الذي أدخل عليه بعض التحسينات. بما أن الشمس أكبر من الأرض، فإن هذه الأخيرة تحمل ظلاً على شكل مخروط. وبما أن الشمس بعيدة جداً والقمر قريب، فإنه يمكننا اعتبار القسم من مخروط الظل الموجود بين الأرض والقمر كأسطوانة يساوي جزؤها الأيمن جزء الأرض الأيمن. إن هذا الظل هو الذي يقطعه القمر عند الخسوف: وبقياس الوقت الذي يأخذه القمر ليقطع هذا الظل، نجد أن قطر القمر يساوي 0,27 مرة قطر هذا الظل. من جهة أخرى، إن القمر يُرى من زاوية تساوي نصف درجة، ولكي يتم رؤيته من هذه الزاوية، يجب إبعاده مسافة تساوي 120 مرة قطره. إن القمر موجود إذاً على مسافة تساوي 30 قطراً أرضياً تقريباً. كانت

هذه هي النتيجة المعروفة منذ القرن الثاني قبل عصرنا. وكان معروفاً أيضاً أنها عبارة عن قيمة متوسطة، إذ إن قطر القمر، وبالنتيجة المسافة، تتغير بنسبة 10٪ تقريباً.

وإلى أريسطرخوس ندين كذلك بطريقة تحديد مسافة الشمس عندما تكون مسافة القمر معروفة. لنأخذ القمر في أحد أرباعه: يشغل كلٌ من الشمس والقمر والأرض عندها رأساً من مثلث قائم الزاوية عند L، وذي زاوية T قابلة للقياس نظرياً تطلعنا على النسبة بين الضلعين LS وLT (انظر الرسم 15).

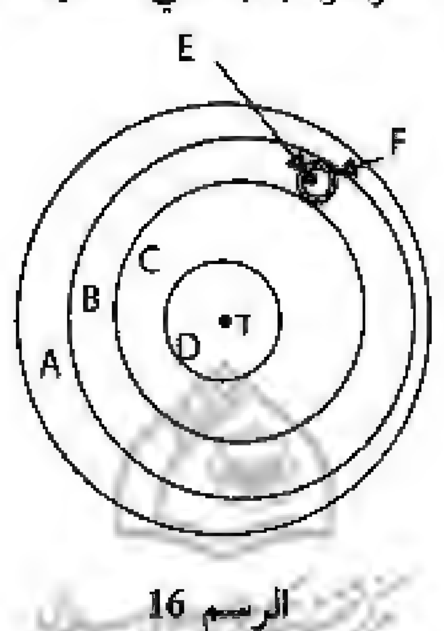


الرسم 15

يعطي أريسطرخوس هذه الزاوية قيمة 87° ويستنتج من ذلك أن الشمس أبعد 20 مرة من القمر تقريباً، وهو يخطئ بالتالي بعامل 20 (الشمس أبعد 400 مرة من القمر). وتكمن الصعوبة من جهة في الدقة غير الكافية في تحديد لحظة تربيع القمر، ومن جهة أخرى في أن الزاوية T ليست مختلفة كثيراً عن 90°، نظراً لبعد الشمس الكبير نسبةً لبعد القمر، وأن خطأً صغيراً يؤدي إلى خطأ كبيرٍ في تحديد النسبة.

ونظراً لعدم توفر أدوات رصد دقيقة بما فيه الكفاية، لم يكن الأقدمون يستطيعون تحديد مسافة الشمس والكواكب بقياس اختلاف المنظر النهاري. ومن هنا يأتي هذا التقدير الخاطئ لمسافة الشمس بطريقة هندسية، وهذه الاستحالة في تحديد مسافات الكواكب في الترتيب البطليمي للكواكب، هذا بغضّ النظر عن مسافات النجوم. غير

أن بطليموس سيعطي، في كتاب **نظريات الكواكب**، تقديراً لأبعاد العالم. وسيستنجد من أجل ذلك بمبدأ الكمال الذي يقول بعدم وجود مساحة فارغة بلا جدوى في الكون: إن أفلاك الكواكب المتوالية هي متجاورة، والأفلاك تشير إلى كرات مادية ذات غلاف سميك بما يكفي لاحتواء سير الكواكب. وهكذا، يقع الكوكب، في الرسم 16، في الكرة E في الفلك F الموجود بدوره في التجويف B.



الرسم 16

يعرض الجدول الآتي المسافات التي وضعها بطليموس:

جرم	نسبة المسافات إلى الحضيض وإلى الأوج	المسافات بالقطر الأرضي الصغرى	الكبرى	المتوسطة
القمر	33/ 64	33	64	48
عطارد	34/ 88	64	166	115
الزهرة	16/ 104	166	1079	622،5
الشمس	57،5/ 62،5	1160	1260	1210
المريخ	1/ 7	1260	8820	5040
المشتري	23/ 37	8820	14187	11503
زحل	5/ 7	14187	19865	17026
النجوم				20000


مرکز تحقیقات کامپیوتری علوم اسلامی

الفصل الثالث

العصور الوسطى

I. الغرب المسيحي

هل أضحت خبرات العلم اليوناني طي النسيان تماماً بعد انحطاط مدرسة الإسكندرية؟ ألم تُستعاد ذاكرتها إلا على يد علماء الثقافة القديمة في عصر النهضة؟ هل سيخيم ليل طويل على الفكر العلمي خلال ما نسميه بالقرون الوسطى؟ ولكن في البداية، عن أي قرون وسطى نتحدث؟ يجب أن نميز فيها أربع حقبات على الأقل. **أولاً**، الفترة المظلمة التي تمتد من غزو البرابرة حتى بداية القرن الحادي عشر. غير أن بضع شخصيات أدركت منذ ذلك الوقت أهمية إنقاذ تراث الحضارات القديمة. ومن بين هذه الشخصيات، نجد بويسيوس (Boèce) (توفي نحو العام 525)، ثم تلميذه كاسيودوروس (Cassiodore) صاحب المؤلف الشهير **المؤسسات** (*Institutions*) الذي استأنفه إيزيدورس الإشبيلي (Isidore de Séville) وطوّره، في حوالى العام 600. ونجد في إنجلترا كذلك بعض من قام بعملية الإنقاذ، من أمثال بيد الموقر (Bède le Vénérable) (توفي في العام 735) وجان سكوت إيريجين (Jean Scot Érigène) الذي عاش في بلاط شارل الأصلع (Charles le

(Chauve) بين العامين 854 و870. ولا بد من أن نذكر أيضاً، على سبيل المثال، أن نظام هيرقليدس (Héraclide du Pont) الذي كان يجعل عطارد والزهرة يدوران حول الشمس كان معروفاً في القرن التاسع من خلال كتاب **اقتران فيلولوجيا وزحل** (Noces) لمارسيانوس كابيلا (Martianus Capella).

ثم استيقظت أوروبا في القرنين الحادي عشر والثاني عشر، وساعدت كثرة شيوع الاتصالات الدولية على إدخال العلوم العربية إلى الغرب. ورائد نهضة القرن الثاني عشر هذه هو أديلارد الباثي (Adélard de Bath) الذي ندين له بالنسخ اللاتينية لـ: **أصول** (Eléments) إقليدوس (Euclide)، **ومجسطي** بطليموس، و *Liber ysagogarum*[*] للخوارزمي. ولد أديلارد الباثي قبيل العام 1090 في باث (Bath)، قرب بريستول (Bristol)، وذهب إلى فرنسا وهو لايزال يافعاً. درس في تور (Tours) ودرّس في لاوون (Laon). ثم سافر إلى صقلية (Sicile)، ثم إلى قليقيا (Cilicie)، وقام بقياسات فلكية في القدس (Jérusalem)، وزار دمشق وبغداد. وبعد أن قضى سنوات كهولته في إنجلترا، عاد إلى صقلية حيث توفي في حوالى العام 1160. لكن إسبانيا أصبحت، خلال هذه الفترة الثانية، المركز الثقافي الكبير حيث يأتي علماء أوروبا كلها لينهلوا من المصادر العربية وبالنتيجة ليكتشفوا من جديد العلوم اليونانية. ويجب ذكر مدرسة طليطلة (Tolède) خاصةً. فقد أصبحت طليطلة، بعد إعادة

(*) هناك أربعة كتب باللغة اللاتينية لأديلارد الباثي حول علم حساب الخوارزمي وتحمل عنوان *Liber ysagogarum*. ويبدو أن مصدر هذه الكتب نصان للخوارزمي قد فُقدا وهما **الحساب الهندي** وكتاب **الجمع والتفريق**. انظر: أندريه آلار، «تأثير الرياضيات العربية في الغرب في القرون الوسطى،» في: **موسوعة تاريخ العلوم العربية**، إشراف رشدي راشد (بيروت: مركز دراسات الوحدة العربية، 1997)، الجزء الثاني.

فتحها عام 1085، عاصمة قشتالة (Castille). وقد أشرف فيها الأسقف ريمون (Raimond) (1126 ـ 1152) على عمل ترجمة قام به اليهودي المهتدي جان دو لونا (Jean de Luna) ورئيس الشمامسة دومينغو غونديزالفو (Domingo Gondisalvo) (والأرجح أن الثاني كان يقوم بكتابة نصوص الأول الإسبانية باللغة الاتينية). وهناك أعمال ترجمة أشرف عليها جيرارد الكريموني (Gérard de Crémone) (1114 ـ 1187) الذي نذكر من بين ترجماته إلى اللاتينية **المجسطي** لبطليموس، **وقياس الدائرة** (*De mensura circuli*) لأرخميدس، **والمخروطات** (*Coniques*) لأبولونيوس، والكتب الثلاثة الأولى من Météorologiques **وفي السماء** (*Traité du ciel*) **والفيزياء** (*Physique*) لأرسطو، بالإضافة إلى عدة مؤلفات للكندي وثابت بن قرة والفارابي.

وتلي هذه المرحلة فترة تأسيس الجامعات ومجدها، وهي تمتد على مدى القرن الثالث عشر وبداية القرن الرابع عشر. وبدأت خلال هذه الفترة حركة خلاّقة تحل محل التلقي السلبي للثقافة العربية، وذلك تحت تأثير ملكين مستنيرين وهما: فريدريك الثاني (Frédéric II)، ملك صقلية، وألفونس العاشر (Alphonse X)، ملك قشتالة. وظل البلاط الصقيلي، بعد موت فريدريك الثاني، في عهد مانفرد (Manfred) وشارل دانجو (Charles d'Anjou)، مركزاً منفتحاً انفتاحاً كبيراً على تأثيرات الشرق.

وتلت هذه الفترة العظيمة ولكن القصيرة مرحلةُ تراجع اقتصادي رافقه انحطاط الجامعات، بين عام 1350 وعام 1450. إن البقايا التي أنقذها رجال الدين الكارولنجيين من التلف، والترجمات اللاتينية لبعض النصوص العلمية اليونانية العظيمة، والمحاولات المستقلة

لحركة خلاقة، كلها تظهر تافهة مقارنة بالتراث اليوناني الذي جمعه المسلمون وقاموا نوعاً ما بتطويره.

II. العالم الإسلامي

إذا استمعنا إلى الأقاويل، فإنها تقول أن مغامرة الفلك الجديدة قد بدأت في بغداد منذ النصف الثاني للقرن الثامن، وذلك بفضل بعثة هندية جاءت إلى الخليفة المنصور. وكان قد انسل في هذه البعثة عالم فلك هندي أغفل التاريخ اسمه، كان قد أحضر معه نصاً فلكياً بالسنسكريتية، تمت على الفور ترجمته إلى العربية على يد محمد بن ابراهيم الفزاري ويعقوب بن طارق تحت عنوان **زيج السندهند**(*). ويجدر ذكر أن مصطلح زيج(**) يعني بالضبط قانون، أي أنه عبارة عن جداول في الحركات السماوية، مصحوبة بطريقة استعمالها ـ أي قوانينها. غير أن هذا المصطلح أخذ بسرعة المعنى لكلمة بحث الأكثر شمولية.

ومهما يكن من أمر هذه الأقاويل، ورغم أنه لم يتم العثور على هذه النسخة الأولى، ولا على الأصل الهندي، ولا على أعمال يعقوب بن طارق والفزاري، فإن الأصل الهندي لعلم الفلك العربي تثبته مقاطع جاءت بعد ذلك تُبيّن بالإضافة إلى هذا أن **زيج السندهند** للفزاري كان يحتوي كذلك على عناصر من علم الفلك الفارسي. زد

(*) كان لزيج السندهند أثر كبير على علم الفلك عند العرب إذ ساهم في تطوير المعارف في حركات النجوم والكواكب وفي قياس هذه الحركات وحسابها، كما كان المرجع الأساسي لعلماء الفلك في عصر الخليفة العباسي المأمون.

(**) جداول رياضية عددية: تحدد حركات الكواكب السيارة في فلكها ووضعها من حيث الارتفاع والانخفاض والميول، وهي بالتالي تسمح بحساب أماكن الكواكب السيارة في وقت زمني محدد.

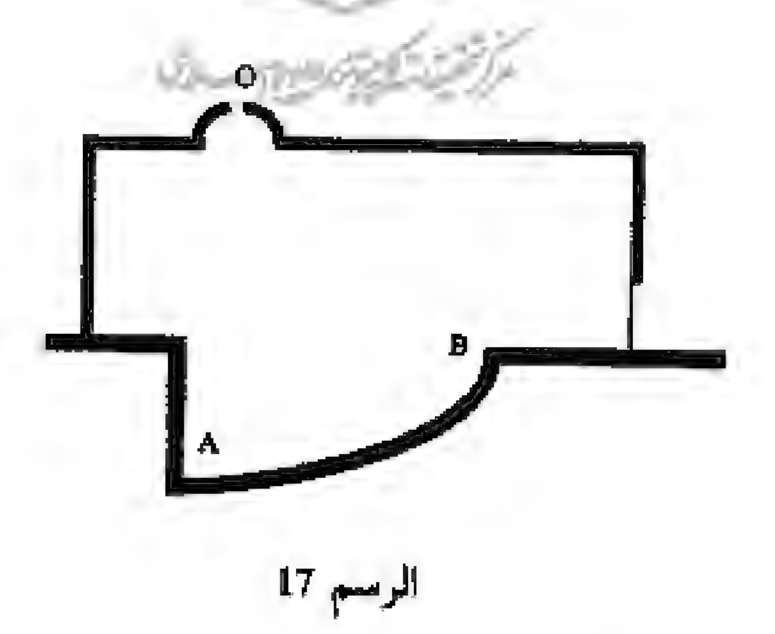
على ذلك أن أول عمل فلكي عربي وصلنا بالكامل يحمل أيضاً عنوان زيج السندهند. وهذا العمل يعود إلى محمد بن موسى الخوارزمي، وهو رياضي وعالم فلك وجغرافي، نعلم عنه أنه ولد قبل العام 800، وتوفي بعد العام 847. ومن الواضح أن لعمله صلات وثيقة ببراهماسفوتاسيدانتا (Brâhmasphutasiddhânta) لعالم الفلك الهندي براهماغوبتا (Brahmagupta) (الذي ولد في حوالى العام 598، وتوفي بعد العام 665)، من دون أن يكون مطابقاً له. وتاريخ هذا النص مثالي. من جهة، تضاف اقتباسات مباشرة من بطليموس إلى العناصر الهندية والفارسية التي هي نفسها متعلقة بعلم الفلك اليوناني. ومن جهة أخرى، إذا كان النص العربي قد ضاع، فإنه وصلنا عبر الترجمة اللاتينية التي قام بها أديلارد الباثي في القرن الثاني عشر انطلاقاً من مراجعة للنص تمت في الأندلس في القرن الحادي عشر. وهذا يعني أن تاريخ هذا النص يمتد تقريباً على طول فترة علم الفلك العربي، من اللحظة التي أخذ فيها علم الفلك العربي الشعلة من أيدي علماء الفلك الهنود إلى اللحظة التي سلّمها فيها إلى الغرب المسيحي. وهذا يعني أيضاً أن علم الفلك العربي، عبر مصادره الظاهرة الثلاثة، هو، قبل كل شيء، وريث علم الفلك البطليمي. يمكننا تقسيم القرون الخمسة لعلم الفلك العربي، من القرن الثامن وحتى القرن الثالث عشر، إلى ثلاث حقبات، وذلك نسبة إلى هذا الأصل اليوناني. نجد في البداية مرحلة جمع، تليها مرحلة تحليل نقدي للمعطيات البطليمية، وأخيراً مرحلة إعادة صياغة النماذج البطليمية وحتى إصلاحها، ولكن من دون الطعن جوهرياً بالفيزياء الأرسطية التي تشكل أساس هذه النماذج.

كما كانت الحال بالنسبة لعلم الفلك البابلي، ستكون المسائل العملية هي الدوافع الأكثر قوة لعلم الفلك في العالم الإسلامي،

سواء أكانت مسائل الشروق والغروب الشمسي للنجوم من أجل تقسيم السنة الشمسية، أم المسائل المتعلقة بتحديد مواقيت الصلاة أو بتحديد اتجاه مكة، أو حساب إمكانية رؤية الهلال القمري الأول في الأفق، مباشرة بعد غروب الشمس. ولم يسبق أن استخدمت أي حضارة قديمة هذا العدد الكبير من علماء الفلك الذي استخدمه المجتمع الإسلامي بين القرنين الثامن والرابع عشر. ويُبرز تاريخ علم الفلك العربي بعض الخصائص التي تنتج عن هذه الملاحظة: إنشاء مراصد عامة أو خاصة، لديها برامج رصد محددة، وبالنتيجة ظهور مدارس فلكية حقيقية، وأخيراً المستوى الرياضي العلمي الرفيع لدى أغلبية علماء الفلك العرب. وكان للمراصد أحياناً، منذ إنشائها، مهمة رصد تدوم ثلاثين عاماً، وهي مدة الدوران النجمي لزحل، أبعد كوكب معروف آنذاك، أو عوضاً عن ذلك مهمة لمدة اثني عشر عاماً، وهي مدة دوران المشتري.

إذا كانت كل المعطيات الأولى المحفوظة هي معطيات أرصاد للشمس والقمر، تمت بشكل متواصل في مراصد منظمة في بغداد ودمشق، منذ الثلث الأول من القرن التاسع، فإننا نعلم أن هذا النوع من حملات الرصد قد بدأ في نهاية القرن الثامن وأن سلسلة المراصد هذه ستبلغ أوجها في الجزء الثاني من القرن الثالث عشر مع مرصد مراغة شمال غربي إيران الحالية، وأنها ستتواصل مع مرصد سمرقند الذي بناه السلطان والعالم أولغ بيغ (Ulugh Beg) في القرن الخامس عشر، ومع مراصد الهند التي بناها جاي سنغ (Jai Singh) في القرن الثامن عشر، وخاصة مرصد جايبور (Jaipur). ولنذكر من سلسلة المراصد هذه مرصد الرقّة، في شمال سوريا حالياً، حيث قام البتّاني بأرصاد متواصلة، ولمدة ثلاثين عاماً، عند ملتقى القرنين التاسع والعاشر. ويبدو أن البتّاني هو أول من استعمل «أنابيب

الرصد». مما جعل بعض الناس يقولون أن علماء الفلك كانوا يملكون مناظير فلكية! غير أنها في الحقيقة لم تكن سوى أنابيب تصويب، خالية من العدسات، ولكن بإمكانها إزالة الضوء المشوش الذي يمكن أن يحيط بالمنطقة المرصودة. ولنذكر كذلك مرصد ريّ الموجود على بعد 12 كلم جنوب طهران والذي قام الخجندي، في نهاية القرن العاشر، بتصميم سدسية كبيرة مخصصة له، ونفّذها من أجل الأرصاد الشمسية، واستعملها في غرفة سوداء: وهي عبارة عن غرفة مظلمة لا يدخلها النور إلاّ عبر فوهة صغيرة في السقف (انظر الرسم 17). وكانت كل درجة على هذه الأداة مقسمة، وفقاً للبيروني، إلى 360 قسماً متساوياً، وكانت كل مسافة عشر ثوانٍ معرّفة بشكل واضح. إنّ الخجندي، الذي لا نعرف عنه شيئاً سوى أنه توفي في العام 1000، دوّن أرصاده في **زيج الفخري** الذي أهداه إلى فخر الدولة، ممول مرصد الرّي.



الرسم 17

لنعد إلى تطور علم الفلك في الإسلام الشرقي. إن اكتشاف الأزياج الهندية هو الذي حث إذاً العلماء العرب على الإهتمام بعلم الفلك البطليمي وعلى المباشرة بنشره. وأشهر هذه العروض التربوية

الأولى كتاب **جوامع علم النجوم والحركات السماوية** (*Compendium sur la science des astres*) الذي ألفه أحمد بن محمد بن كثير الفرغاني حوالى العام 850. وكان عالم الفلك هذا، الذي نعلم أنه توفي في مصر بعد العام 861، في خدمة الخليفة العباسي المأمون الذي حكم في بغداد بين العام 813 والعام 833. وندين له كذلك بدراسة حول بناء مزاول شمسية في **كتاب أمل السخامات**. وهذه **الجوامع** هي عبارة عن ملخص **للمجسطي**، ويتضمن، بالإضافة إلى مختلف حسابات الأشهر والسنوات حسب العصور، وصف النقاط الأساسية لعلم فلك بطليموس. ونجد في البداية قواعد علم الكون: الأسباب التي تدفعنا إلى الاعتقاد أن الشمس والأرض كرويتان، وأن الأرض ثابتة في وسط السماء التي تتحرك بفعل حركتين دائريتين، والنماذج ذات الأفلاك الخارجة المركز والنماذج ذات أفلاك التدوير. ثم تأتي مسائل علم الفلك العملي: ميل دائرة البروج بالنسبة لخط الاستواء، حركات الكواكب السيارة السبعة (القمر، والشمس والكواكب الخمسة) على خطوط الطول وعلى خطوط العرض، ظاهرة مبادرة النجوم، المسافات بين الأجرام السماوية والأرض، وأحجامها، وأوجه القمر، بالإضافة إلى خسوفات القمر وكسوفات الشمس. وإذا كانت **جوامع** الفرغاني وصفية محضة ولا تتضمن أي براهين رياضية، فإنها تكشف عن الآثار الأولى لتحليل نقدي وعن التصويبات الأولى التي سيوجهها العرب إلى **المجسطي**. فيصحح الفرغاني على وجه خاص القيمة البطليمية لميل دائرة البروج 23° 51' بـ 23° 33'، ويؤكد أن أوج الشمس وأوج القمر، اللذين اعتبرهما بطليموس ثابتين، يتبعان في الحقيقة حركة تبادر النجوم الثابتة. ويجدر الذكر أن القيمة الحديثة للميل التي تم قياسها في عصر بطليموس تساوي 23° 40' مقابل 23° 35' في عصر الفرغاني.

وهكذا، بدأ عمل تدقيق وتصويب، بعد فترة قصيرة من نشر علم فلك بطليموس باللغة العربية. لا ريب أن علم الفلك هو ابن عصره وأن القرون السبعة التي تفصل بين **المجسطي** والأزياج تزيد الفوارق بين مواقع الأجرام التي تم حسابها وفقاً للنظام البطليمي والمواقع المرصودة، مما يفرض ليس فقط إعادة ضبط الجداول بإضافة تصحيح بسيط لكل سطر، بل كذلك تصحيح المعطيات الوسطية للنماذج، وحتى التشكيك بالنماذج نفسها. ويمكننا أن نعطي، على سبيل المثال، أن واضع **كتاب في السنة الشمسية** (*Livre sur l'année solaire*)، وهو مؤلَّف كُتب على الأغلب قبيل العام 850، يرتكز على أرصاد تمت بين العامين 820 و830 في بغداد ودمشق وجمعها يحيى بن أبي منصور (توفي في العام 832) في **الزيج الممتحن**(*) (*Tables vérifiées*). ويُظهر الكاتب المجهول لهذا المؤلف أن أوج الشمس في عصره يقع عند 20° 45' في صورة الجوزاء، وبالنتيجة أنه ليس ثابتاً كما كان يعتقده بطليموس، فقد انزلق 15" 15' خلال التسع مئة والخمسين سنة التي تفصل بين الكاتب وهيبارخوس، أي أنه انزلق بقدر يساوي قدر حركة مبادرة النجوم خلال الفترة الزمنية نفسها. غير أن بطليموس ظل، بالنسبة للكاتب، الشخص الذي عرف بناء أفضل نظام هندسي يسمح بوضع جداول حركة الشمس.

(*) الزيج الممتحن هو عبارة عن جدول فلكي لمواقع النجوم والتغيرات التي تطرأ على الفلك. وهو أول زيج عربي يستند على أسس علمية، إذ جاء نتيجة لأرصاد تمّت في عهد المأمون. ومن أهمية هذا الزيج أنه مكّن العرب من تصحيح اعتقاد بطليموس الذي كان يقول بأن أوج الشمس لا يخضع سوى للحركة اليومية وبالتالي اكتشاف أن أوج الشمس مرتبط بحركة مبادرة الاعتدالين. وقد اعتمد العديد من علماء الفلك العرب على هذا الزيج، ومن بينهم البيروني الذي أثنى عليه في مؤلّفه **الآثار الباقية عن القرون الخالية**، والبتاني الذي اعتمد عليه في مؤلّفه **الزيج الصابي**.

وسيعود الفضل في إعادة العمل ببراهين بطليموس إلى ثابت بن قرة الذي ولد في حرّان، شمال غربي بلاد ما بين النهرين، في العام 824. أنتج ثابت بن قرة مؤلفات في كل مجالات عصره العلمية، ونُسبت إليه 30 دراسة في علم الفلك وصلنا من بينها 8، ولكنه ظل مشهوراً كعالم رياضيات على وجه الخصوص. لن نذكر من بين المسائل النظرية التي تطرق إليها والتي جعلته يشك في صحة حلول بطليموس، سوى مسألة اختيار الفترات الزمنية لتحديد حركات القمر. والعنوان الكامل لهذه الدراسة كفيل بالكشف عن هدف هذه الأعمال من ترييض علم الفلك الإغريقي: **في إيضاح الوجه الذي ذكر بطليموس أن به استخرج من تقدمه مسيرات القمر الدورية وهي المستوية** (*Clarification d'une méthode rapportée par Ptolémée, à l'aide de laquelle ceux qui l'avaient précédé avaient déterminé les divers mouvements circulaires de la Lune, qui sont des mouvements uniformes*). وهذا هو السؤال الذي يطرحه بطليموس في الفصلين الأول والثاني من الكتاب الرابع من **المجسطي**. إن تحديد حركات القمر، بالنسبة لبطليموس، يجب ألا يتم ابتداءً من أي أرصاد كانت، بل يجب أن يبدأ بأرصاد خسوفات القمر لأنها الوحيدة التي تمكننا من إيجاد المواقع الحقيقية للقمر. ففي هذه الأوقات المميزة، لا يتأثر تحديد المواقع النسبية للقمر والشمس باختلاف منظر القمر. وإذا كان لدينا عدد كاف من أرصاد الخسوفات، علينا عندها انتقاء الفترات الزمنية التي تحصل خسوفات القمر عند أطرافها بشكل دوري، وبحيث يكون القمر قد دار دورات كاملة على كل فلك من أفلاكه. وتعطي قسمة بسيطة عندئذ دورية حركات القمر المختلفة.

أما ثابت بن قرة، فإنه ينطلق مباشرة من نظرية حركة الشمس كما ريضها في دراسة سابقة عنوانها: **إبطاء الحركة وسرعتها في فلك**

البروج بحسب الموضع التي تكون فيه من الفلك الخارج المركز (*Ralentissement et accélération du mouvement sur l'excentrique selon l'endroit où ce mouvement se produit sur l'écliptique*). إنـــه يأخذ على الفلك الخارج المركز، وخلال فترتين زمنيتين متساويتين، قوسي حركة متوسطة متساويين، ثم يثبت، عبر طرح مسألة النسبة بين قوسين متناظرين تم رصدهما على دائرة البروج، أننا نحصل على سبع طرق تركيب بين الحركة المتوسطة والحركة الظاهرة. خلال هاتين الفترتين الزمنيتين المتساويتين، تتساوى الحركات الظاهرة في الطرق الأربعة الأولى، في حين أنها تتفاوت في الطرق الثلاث الأخيرة. بالإضافة إلى ذلك، تتساوى الحركة المتوسطة والحركة الظاهرة في الطريقتين الأولى والثانية. إن النموذج الهندسي الذي يعرض حركات القمر هو أكثر تعقيداً من النموذج الهندسي الذي يعرض حركات الشمس، فإن حالة القمر بالمطلق أكثر تعقيداً. ولكن ثابت، باتخاذه فرضية أن خسوفات القمر تحصل عند أطراف فترتين زمنيتين معتبرتين، يظهر أن تركيب الحركات ينفذ كذلك إلى سبع طرق مماثلة لطرق الشمس. وأخيراً يعتمد على ست من السبع حالات لأسباب متعلقة إما بحركة الشمس أو بحركة القمر، ليبيّن أنه يجب الإحتفاظ بالطريقة الأولى فقط، عندما ينطلق كل من الشمس والقمر من النقطة نفسها على دائرة البروج ليعودا إليها. وذلك لأن الشمس والقمر يكونان، في هذه الحال فقط، قد قاما بعدد صحيح من الدورات على مختلف أفلاكهما الخاصة بكلّ منهما. وكان بطليموس قد وصل إلى النتيجة نفسها ولكن عبر التحليل ابتداءً من نقاط خاصة، في حين أن ثابت يدرس المسألة الهندسية في شموليتها، وأن تحليله شامل واستنتاجه لا يمكن نقضه. فتحليله بالغ الدقة، ولكنه يبقى داخل إطار النماذج الهندسية البطليمية.

وهناك شخصية بارزة أخرى من هذه الحقبة، لا يمكننا إغفالها لشدة ما أثرت بعلم فلك القرون الوسطى الغربية اللاتينية وعلم فلك بداية النهضة، وهي: البتاني. ولد البتاني في منتصف القرن التاسع في حرّان، وعمل في رصد النجوم لأكثر من ثلاثين عاماً في الرقّة. وفي الواقع، إنه راصد عظيم أكثر مما هو واضع نظريات. إن تحديده لميل دائرة البروج، على سبيل المثال، يدعو إلى الدهشة لشدة دقته وهو: 23° 35′، وكذلك التحديد الذي وضعه لموقع أوج الشمس عند 22° 50′ 22″ في صورة الجوزاء. وهو أول من قال بإمكانية حصول كسوف حلقي للشمس، إذ إنه يعتقد أن القطر الظاهر للقمر يتراوح، عند اقترانه مع الشمس، بين 29′ 30″ و35′ 20″ (المقاييس الحديثة هي على التوالي 29′ 20″ و33′ 30″)، وأن القطر الظاهر للشمس يتراوح بين 31′ 20″ و33′ 40″ (المقاييس الحديثة هي على التوالي 31′ 28″ و32′ 32″). ولنذكر أن بطليموس كان يعتبر أن القطر الظاهر للشمس ثابت دائماً عند 31′ 20′ وأن هذه القيمة كانت بالضبط قيمة الحد الأدنى للقطر الظاهر للقمر. بيد أن البتاني يقبل بقيمة مبادرة الإعتدالين التي أعطاها ثابت ويعيد استعمالها، وهي تساوي 1° خلال ست وستين سنة، وهي قيمة أفضل بكثير من الـ 1° خلال مئة سنة التي أعطاها بطليموس، رغم أنها 10٪ أكبر مما يجب أن تكون عليه، إذ أن مقياس القيمة الحديثة تبلغ 1° خلال اثنتين وسبعين سنة. إذا كانت شهرة البتاني تأتي من كونه راصداً وهذه ميزة من مزاياه التي لا جدال فيها، فإنه اشتهر كذلك بعمله الضخم، **الزيج الصابي**(*) (*Les Tables sabéennes*)، الذي يُعدّ

(*) يحتوي الزيج الصابي على جداول لحركات الكواكب كما حددها البتاني. كان لهذا الزيج تأثير كبير ليس على العالم العربي فحسب بل كذلك على علم الفلك وعلم المثلثات الكروي في أوروبا في العصور الوسطى وبداية عصر النهضة. وقد تُرجم من العربية إلى =

الدراسة الوحيدة الكاملة لعلم الفلك العربي التي تمت ترجمتها بالكامل إلى اللاتينية في القرن الثاني عشر، ثم إلى الإسبانية في القرن الثالث عشر.

ولكن عالم الفلك الذي يتوج هذه المرحلة من التحليل النقدي لعلم الفلك الإغريقي ويسيطر عليها هو البيروني. ولد البيروني عام 973 في خوارزم، جنوبي بحر آرال، وتوفي بعد العام 1050 في غزنة، في أفغانستان حالياً. تُنسب إليه 146 دراسة، من بينها 14 ذات أهمية كبيرة. يبرز مؤلفه في **الأسطرلاب** (*Traité de l'astrolabe*) من بين عدد كبير من دراسات قرون وسطية رديئة مخصصة لهذه الأداة الباهرة أكثر من كونها عملية، وكذلك مؤلفه الكبير الشامل لمعارف عصره الفلكية **القانون المسعودي في الحياة والنجوم**(*) (*Les Tables dédiées à Mas'ûd*) الذي كتبه حوالى العام 1035. وقدّم البيروني في بداية هذا الكتاب المبادئ العامة لعلم الفلك وأسس التسلسل الزمني في مختلف الثقافات. ثم ينتقل إلى ما هو أكثر أهمية بالنسبة لموضوعنا، وهو الموقع النسبي للأرض والسماء: إنه موضوع سيدفعه إلى التفكير في دوران الأرض. وفقاً للبيروني، هذا الدوران للأرض على نفسها الذي رفضه بطليموس لأسباب خاطئة، كان قد أشاد به عالم الفلك الهندي آريابهاتا (Aryabhata). انطلاقاً من ذلك،

= اللاتينية في القرن الثاني عشر، وفي القرن الثالث عشر إلى الإسبانية بأمر من ألفونس العاشر ملك قشتالة.

(*) سُمي هذا الكتاب بالمسعودي تيمُّناً بسلطان خوارزم مسعود بن السلطان محمود الحكم. ويُشكّل موسوعة فلكية جمع البيروني فيها النتائج التي توصل إليها علماء الفلك اليونانيون والهنود وحتى علماء الفلك المعاصرين له، كما تناول مسائل عدّة من بينها مبادئ علم الهيئة وهيئة السماء وحركة الكرة السماوية اليومية الظاهرية حول الأرض وحساب المثلثات المستوية والكروية... إلخ.

يمكن أن نتوقع أن يتبنى البيروني مبدأ هذا الدوران، خصوصاً وأنه يشير إلى أن عالماً كبيراً لا يذكر اسمه، قد دحض برهان بطليموس الذي يقول بأن الهبوط الحر للأجسام لا يحصل عمودياً، وأعطى برهاناً معاكساً يقول بأن حركة الدوران هذه تدفع كل جسم أرضي على طول الخط العمودي الذي يقع الجسم وفقاً له. وهو بذلك يستبق مبدأ العطالة. ولكن ذلك لم يحصل، فالبيروني لا يستند على الحركة العامودية لرفض الحركة اليومية، بل على الحركة الأفقية! ويحسب، في فرضية الدوران، السرعة في نقطة على الأرض ويلاحظ أن هذه السرعة كبيرة جداً، ثم يسلّم أنه يجب إضافتها أو إنقاصها وفقاً لاتجاه حركة الجسم الأرضي (العصافير التي تغادر العش ثم تعود إليه)، وهذا ما لا يمكن برهنة صحته. وهكذا، فإن علم الفلك عند البيروني سيظل، في قواعده الأساسية، بطليمي محض. ولكن واحداً من معاصريه، ابن الهيثم، هو من سيبدأ بتفكيك الإطار البطليمي.

يجدر بنا في البداية العودة إلى «آريابهاتا» الذي ذكرناه سابقاً. ليس المقصود عالم الفلك الشهير الذي ألّف كتاب **الماهاسيدانتا** (*Mahâsiddhânta*)، المعروف أيضاً **بأرياسيدانتا** (*Aryasiddhânta*)، والذي كان ناشطاً في القرن الحادي عشر، بل «آريابهاتا الأول»، وهو كاتب من القرن الخامس. ويستند البيروني إلى أحد مؤلفاته، **أريابهاتيا** (*Aryabhatiya*)، الذي تمت ترجمته إلى العربية في نحو العام 800 تحت عنوان **زيج الأرجبهار**.

إذاً أصبح علم الفلك عظيماً في القرن الحادي عشر على يد ابن الهيثم ـ الذي يعرف في الغرب باسم الهازن ـ وهو وُلد في القاهرة في العام 965 وتوفي فيها في نحو العام 1040. إن ابن الهيثم لم يقم بكتابة **زيج** وإنما **شكوك**، أي نقد مع اقتراحات الحلول. وهذا النقد

سيتناول ليس فقط **المجسطي** ولكن **فرضيات الكواكب** و**علم البصريات** (*Optique*) لبطليموس أيضاً. ويحدد ابن الهيثم نواياه منذ بداية كتابه **كتاب الشكوك على بطليموس**: صحيح أن بطليموس عالم فلك عظيم، ولكن يجب أن نعكف على المسائل التي لم يشرحها بشكل صحيح وعلى المسائل التي تتعارض حلولها مباشرة مع القواعد الجوهرية لعلم الكون الأرسطي. وسيلي هذا الإعلان ثلاثة أقسام، كل قسم مخصص على التوالي للمؤلفات المذكورة أعلاه.

إذا ألقينا نظرة سريعة على نقد **المجسطي**، نجد فيه سبع نقاط اختلاف: إن طريقة تقدير القطر الظاهر للشمس في الأفق وفي وسط السماء لا تراعي مبادئ علم البصريات، يظهر تعريف الاتجاهات في الفضاء بالنسبة إلى وسط العالم أخطاء تصورية، إن تحديد وتر قوس درجة - وهذه مسألة دقيقة في هذا العصر - خاطئ رياضياً، كما أن طريقة تحديد الميل قابلة للجدال، وكذلك نظرية الكسوفات ونظرية الحركات على خطوط العرض، وأخيراً - وتشكل هذه النقطة موضوع القسم الأكثر أهمية - إن إدخال نقطة تساوٍ لا يتوافق مع مبدأ الحركة الدائرية المنتظمة، وهو مبدأ لم يكن يُمسّ. وهنا نصل إلى اعتراض سيعيده بقوة علماء الفلك في مدرسة مراغة، ثم كوبرنيكوس.

لنتحدث إذاً عن علماء الفلك في مدرسة مراغة الذين نعد من بين أشهرهم العُرضي والطوسي وقطب الدين الشيرازي وابن الشاطر. أصبحت تسمية مدرسة مراغة اليوم معترف بها على نطاق واسع، بالرغم من أن آخر عالم فلك، وربما الأهم، من بين الأربعة المذكورين أعلاه لم يشتغل قط في مراغة. ولكن ابن الشاطر بنفسه يندرج حقاً في تبعية سلالة مراغة هذه.

ومهما يكن من أمر، فإن أول اسم كبير يظهر هو اسم الطوسي. الطوسي هو عالم معادن وعالم فلك ورياضي وفيزيائي وفيلسوف

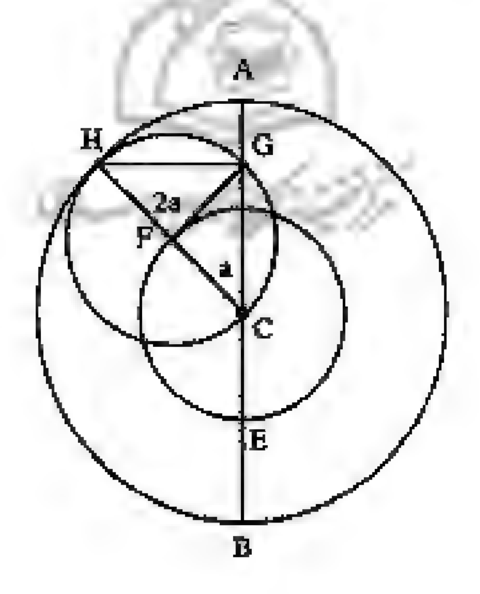
وفقيه، ولد عام 1201 في طوس في إيران وتوفي في بغداد عام 1274. إنه هو الذي أشرف على بناء مرصد مراغة. وحين أن بناء هذا المرصد بدأ في العام 1259، فإن المهمة التي أوكلت إليه انتهت عند حلول العام 1272 على شكل المؤلَّف الذي يحمل عنوان **الزيج الألخاني**(*) (*Tables astronomiques ilkhaniennes*). وعلى هامش هذا العمل التأسيسي والإحيائي لمرصد مراغة، يدين علم الفلك إلى الطوسي بزيج، وبتحقيق إبتدائي **للمجسطي**، وبالأخص بدراسة عنوانها **تذكرة**، تجد فيها النقد الأكثر دقة لشوائب علم الفلك البطليمي، واقتراحات نماذج رياضية جديدة للتعبير عن مظاهر الكواكب. وستؤثر هذه **التذكرة** ليس فقط في الشيرازي والشاطر اللذين خلفا مباشرة الطوسي، بل ستؤثر كذلك في علماء فلك النهضة، ومن بينهم، على ما يبدو، كوبرنيكوس، من دون أن نتمكن من إيجاد مسيرة هذه الأعمال إلى كراكوفيا (Cracovie). يمكننا على الأكثر اقتراح أن الطريق الأكثر احتمالاً هي طريق بيزنطة (Byzance). لكن إذا كان الطوسي مازال يثير اهتمام مؤرخي علم الفلك، فذلك بالأخص لاكتشافه ما نسميه اليوم، على أثر المؤرخ إدوارد كندي (E. S. Kennedy)، مزدوجة الطوسي(**).

إذا كانت نقطة التساوي هي في علم الفلك البطليمي الغش الأكثر روعة تجاه علم الكون الأرسطي، فهنالك غش آخر أكثر كتماناً أزعج علماء الفلك العرب: وهو أن شدة إهليليجية مدار عطارد كانت تتطلب تنشيط القطر الأخير لفلك الدائرة بحركة ذهاب وإياب

(*) يتألف **الزيج الألخاني** من أربعة مقالات في التواريخ، وفي سير الكواكب ومواقعها طولاً وعرضاً، وفي أوقات مطالع النجوم، وفي أعمال النجوم الأخرى. وكان هذا الزيج من المصادر التي اعتُمدت في الدراسات الفلكية في في عصر إحياء العلوم في أوروبا.

(**) أطلق الطوسي على اكتشافه هذا اسم «أصل الكبيرة والصغيرة».

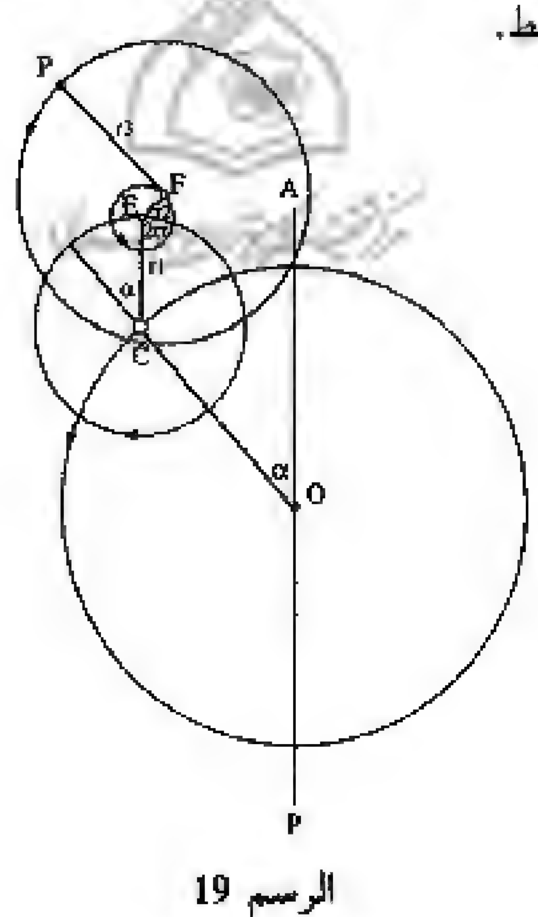
خطّية لا يمكن أن تتوافق مع عقيدة الحركة الدائرية المنتظمة. غير أن الطوسي يظهر، في الفصل 13 من الكتاب الثاني من **تذكرته**، أنه إذا وُجدت دائرتان على المسطح نفسه، وكان قطر واحدة يساوي نصف قطر الأخرى، وإذا كانت الصغرى ملامسة داخلياً للكبرى، وإذا حركنا هاتين الدائرتين بحركات منتظمة ذات اتجاهات معاكسة بحيث تكون حركة الدائرة الصغرى ضعف حركة الكبرى، فإن نقطة ما على الدائرة الصغيرة ترسم قطراً ما للدائرة الكبرى (النقطة G على الرسم 18). بكلمات أخرى، إن تشكيل حركات دائرية منتظمة يمكن أن يولّد حركة خطية. وذلك هو ما ينقذ، ظاهرياً، أولية الحركة الدائرية المنتظمة، ولكنه، أساسياً، يدمر كل ملاءمة مع الثنائية الأرسطية للحركات: الخطي مخصص للأرضي، والدائري للسماوي.



الرسم 18

هناك اسم آخر يوسم أوج علم الفلك العربي، وهو اسم ابن الشاطر الذي ولد في دمشق في سوريا في حوالى العام 1305، وتوفي في دمشق كذلك نحو العام 1375. إن مساهمته الأكثر أهمية في علم الفلك هي نظريته عن الكواكب التي يدخل فيها على نظرية

بطليموس التعديلات الأكثر ابتكاراً والأكثر فعالية. إن نموذجه الهندسي الذي ينقذ ظواهر الكواكب الخارجية معقّد على وجه خاص، فهو يتضمن ثلاثة أفلاك للتدوير (انظر الرسم 19). تتحرك النقطة C على فلك حامل ذي شعاع r يتحرك من الغرب إلى الشرق على وتيرة الحركة المتوسطة على خطوط الطول. يدور فلك التدوير الأول ذو الشعاع r_1 والمركز C من الشرق إلى الغرب على وتيرة الفلك الحامل نفسها مصححة بحركة الأوج. وهكذا، فإن الشعاع CE يظل موازياً لخط القبا. يدور فلك التدوير الثاني ذو الشعاع r_2 والمركز E من الغرب إلى الشرق بسرعة تساوي ضعف سرعة دوران فلك التدوير الأول. وأخيراً، يقع الكوكب P على فلك التدوير الثالث ذي الشعاع r_3 والمركز F، ويدور من الغرب إلى الشرق على وتيرة الانحراف المتوسط.



الرسم 19

ويتعقد هذا النموذج في حال عطارد بإضافة دائرتين إضافيتين

للتعبير عن حركة الذهاب والإياب لقطر فلك التدوير الأخير. وإذا كان صحيحاً أن كوبرنيكوس يبدو وكأنه عرف نموذج عطارد للشاطر واستعمله، فإنه من الواضح أن الشاطر لم يتخيل، أكثر من سابقيه أو معاصريه، التوضيح الكوبرنيكي لمركزية الشمس، هذا التوضيح الذي يحمل الثورة التي سيحمل لواءها كبلر (Kepler) وغاليليه (Galilée). عندما توفي آخر عالم فلك عربي شرقي عظيم، هو الشاطر، كانت الأرض لاتزال ثابتة في مركز العالم.

إذا كان علم الفلك العربي الغربي، الذي تطور خصوصاً في الأندلس، سيلعب دوراً حاسماً في نشأة علم الفلك في أوروبا المسيحية، فإنه لن يبلغ أبداً جودة أخيه الشرقي. وربما يعود ذلك إلى الموقف الصلب تجاه خرق علم الكون الأرسطي. صحيح أن علماء الفلك العرب قد رفضوا نقطة التساوي، ولكنهم كانوا يعتبرون رفض النماذج ذات أفلاك التدوير أو النماذج ذات الأفلاك الخارجة المركز كمسألة خاطئة. فالشاطر كتب على سبيل المثال ما يأتي: «إن وجود دائرتين صغيرتين لفلك التدوير، لا تدوران حول الأرض، ليس مستحيلاً إلاّ في الكرة التاسعة». إن مشكلتهم الحقيقية ستكمن في بناء نماذج هندسية تصف حركة الكرات التي تدفع الأجرام المختلفة، من دون أن تتعارض هذه النماذج مع الحقيقة المادية لهذه الكرات الحاملة.


مرکز تحقیقات کامپیوتری علوم اسلامی

الفصل الرابع
الثورة الكوبرنيكية

I. كوبرنيكوس

1. مقدمة

كان نيكولا كوبرنيكوس (Nicolas Copernic) من رعايا ملك بولونيا، ولد في 19 شباط/ فبراير عام 1473 في تورن (Torun). من المعروف أنه التحق بجامعة جاجلون (Jagellone) في كراكوفيا (Cracovie) عام 1491، وأنه درس فيها الفنون الثلاثة ـ قواعد اللغة والعلوم الجدلية وعلم البيان ـ ثم العلوم الرياضية الأربعة ـ علم الحساب وعلم الهندسة والموسيقى وعلم الفلك. ولكنه وجد في كراكوفيا أكثر من تعليم علم الفلك التقليدي الذي غالباً ما يكون ضعيفاً جداً: لقد أسس ألبرت برودزويسكي (Albert de Brudzewo) في كراكوفيا، حوالى منتصف القرن الخامس عشر، مدرسة لعلم الفلك والرياضيات. ومن الممكن أن يكون كوبرنيكوس قد تلقى تعليماً خاصاً من ألبرت برودزويسكي، إذ إن تعليماً إضافياً كهذا لم يكن بالأمر الاستثنائي، ولكننا لا نملك أي وثيقة تثبت ذلك. وعلى كُلٍّ، عندما التحق كوبرنيكوس بجامعة بولونيا (Bologne) لمتابعة

دروسه في القانون الكنسي في خريف 1496، وجد نفسه مساعداً لدومينيكو ماريا نوفارا (Dominico Maria Novara)، وهو عالم فلك معروف نسبياً في ذلك العصر عبر مؤلّف نُشر عام 1489، يُؤكد فيه أن مقياس خطوط عرض المدن المتوسطية كانت عندها مرتفعةً أكثر بـ 1° 10' من القيمة التي ذكرها بطليموس في مؤلّفه **الجغرافيا** (*Géographie*). وقد استنتج نوفارا من هذا الارتفاع النظامي في خطوط العرض أن اتجاه محور الأرض يتغير بشكل بطيء وتدريجي. ولا بد أن كوبرنيكوس قد استخلص من ذلك أن تغيّر اتجاه القطب الشمالي يعني أن الأرض لا تتمتع بالجمود المطلق الذي فرضه عليها «بطليموس» على إثر «أرسطو».

عاد كوبرنيكوس إلى وطنه بولونيا في حزيران/ يونيو عام 1503. وخلال بضع سنوات، رافق عمه، الذي كان أسقفاً في وارميا (Warmie)، في تنقلاته الكنائسية والدبلوماسية بصفته سكرتيراً وطبيباً في آن معاً، ثم عاد بشكل نهائي إلى العزلة في مدينة فرومبورك (Frombork) الصغيرة حيث كان قد حصل على وظيفة كاهن قانوني. وهناك، في دوقيّة وارميا المُطوّقة بالمملكة البولونية التي كانت محاطة بإقطاعات فرسان من النظام التوتوني، سيشارك كوبرنيكوس في إدارة مجلس الكهنة، وفي الصراعات الأخيرة ضد الفرسان، وسيتابع ممارسة الطب قليلاً، وسيكرّس نفسه لمؤلّف حياته وهو: **في دوران الأجرام السماوية** (*De revolutionibus orbium caelestium*).

2. مؤلّف في دوران الأجرام السماوية

نُشر مُؤلّف **في دوران الأجرام السماوية**، الذي أراده كاتبه أن يكون **المجسطي** الجديد، عام 1543، وهي السنة نفسها التي توفي فيها نيكولا كوبرنيكوس. ويعرض الكتاب الأول البنية العامة للعالم

والأسس الفيزيائية التي بنى عليها كوبرنيكوس إنقاذ الظواهر وعرض كل الأرصاد المعروفة. أما الكتاب الثاني فهو مخصص للمسائل الرياضية لعلم الفلك الكروي؛ وهو يتضمن بالإضافة إلى ذلك جدول نجوم هو جدول بطليموس مصحح بتأثير مبادرة الاعتدالين. ويتناول الكتاب الثالث حركة الشمس الظاهرة. أما الكتاب الرابع فيتناول حركة القمر ونظرية الخسوفات. وخُصص الكتابان الخامس والسادس على التوالي لحركات الكواكب على خطوط الطول وعلى خطوط العرض.

إن الفصل العاشر من الكتاب الأول هو الفصل الذي يعرض فيه كوبرنيكوس النظام الجديد للعالم(*). وتمكث الشمس في مركز هذا النظام، أو بالأحرى قرب هذا المركز؛ ثم يأتي عطارد والزهرة وتليهما الأرض التي تصبح مجرّد كوكبٍ عاديٍ يرافقه القمر في مساره السنوي، وبالإضافة إلى ذلك، تدور الأرض كل يوم حول نفسها. ويأتي المريخ والمشتري وزحل وراء مدار الأرض الذي يُسمى بالمدار الكبير بالنسبة إلى أهميته الكونية أكثر مما هو لحجمه. وأخيراً يحيط بهذا النظام كرة النجوم الثابتة التي تستحق منذ الآن صفة «الثابتة» هذه لسببين: هي ثابتة نسبياً، بعضها بالنسبة إلى بعض (كما في نظام بطليموس)، وهي ثابتة بالمطلق، لأنه، من الآن فصاعداً، يمكن تفسير حركتها الظاهرة من الشرق إلى الغرب عبر دوران الأرض من الغرب إلى الشرق.

(*) وزّع كوبرنيكوس في العام 1514 «تعقيباً موجزاً» يتضمن نظاماً جديداً للعالم كما يتصوّره هو. وهو يقول أن مركز الأرض ليس مركز الكون وأن كل الكواكب تدور حول الشمس، وبالنتيجة أن الشمس هي مركز الكون. وبما أن الأرض أصبحت كسائر الكواكب، فإنها تدور حول الشمس. وما يبدو لنا كحركات للشمس ينتج في الحقيقة عن حركة الأرض هذه حول الشمس. كما يفترض أن الأرض تدور حول نفسها دورة كاملة في اليوم، مما يجعل القبة السماوية تبدو وكأنها تتحرك في حين أنها في الحقيقة ثابتة.

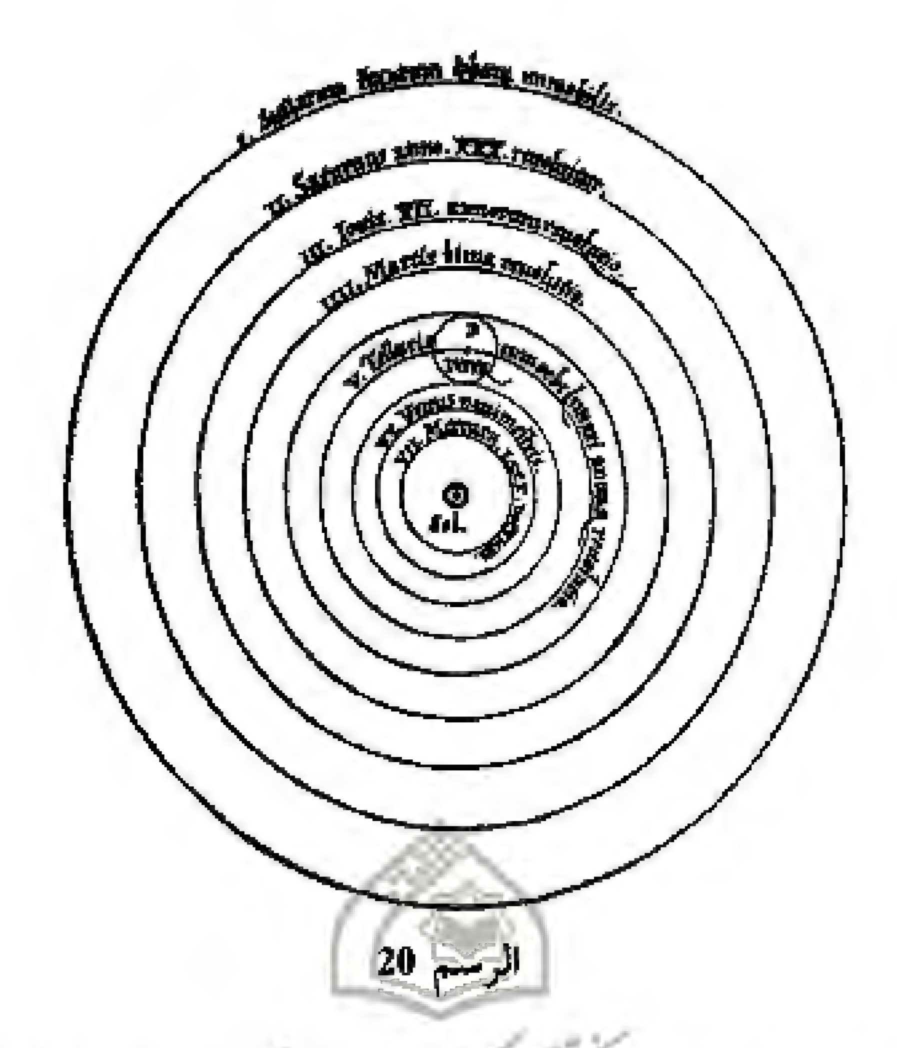
إذاً، إن التغير طفيف جداً في الظاهر: في الآلية الكبيرة للعالم هناك قطعتان اثنتان ـ هما الأرض والشمس ـ تتبادلان مكانهما ووظيفتهما. بيد أن هذا التبادل يشكل الفعل المؤسس لثورة علمية سيأتي مؤلَّف نيوتن لإتمامها ولإعطائها شرعيتها. ولكن بعض مؤرخي علم الفلك، وليسوا الأقل شأناً (نوجباور وتلاميذه)، يشككون اليوم بهذه الأهمية. لنوضح هذا النقاش الذي يمكن أن يُدهش. يقدم كتاب **في دوران** من جهة نظاماً جديداً للعالم، أي علم كون جديد، ومن جهة أخرى علم فلك عملياً ليس سوى تبديل هندسي للنماذج اليونانية الأرضية المركز بنماذج شمسية المركز. ويبدو هذا التبديل أحياناً صعباً وغير سويّ، وفي بعض الحالات غير كافٍ. وهكذا، فإن نظرية خطوط العرض عند نيكولا كوبرنيكوس أكثر إبهاماً منها عند بطليموس، وحتى أكثر صعوبة في الاستعمال، وذلك لأن كوبرنيكوس ارتكب خطأ تمرير كل مستويات دوران الكواكب بشمس متوسطة تشكل بالنسبة لكوبرنيكوس مركز العالم الحقيقي، في حين أنه كان يجب أن يمررها بالشمس الحقيقية. وكذلك الحال بالنسبة لنظرية التقهقرات التي يبدو أن كوبرنيكوس يجهل نفائسها: في حين أن حركة الأرض، إذا ما نُسقت مع حركة الكواكب، تسلط ضوءاً جديداً ومبسّطاً على لغز التوقفات والتقهقرات، من الغريب أننا لا نجد في كتاب **في دوران** أي جداول عن هذه الظواهر، رغم أنها موجودة في **المجسطي** لبطليموس. والأسوأ من ذلك بالنسبة إلى شهرة عالم الفلك الممارس كوبرنيكوس أنه يحاول من دون جدوى أن يصنع منها نظرية على طريقة بطليموس، أي بواسطة نظرية أبولونيوس ولكن مطبقة على جسم الأرض المتحرك (انظر لاحقاً). يجب إذاً ألاّ نبحث عن عظمة كوبرنيكوس في علم فلكه العملي، فهي بالتأكيد موجودة في علم الكون الذي وضعه وفي علم الديناميك الذي سيؤدّي إليه.

يجب أن نذكر في البداية أن علم فلك بطليموس كان يقبل بالعديد من المسلّمات الأرسطية التي كانت تقفل تطوّره. والقفل الأول هو مركزية الأرض التي تقول بأن الأرض ثابتة تماماً وبأنها المركز الذي تعود إليه كل الأجسام الكبيرة، وهي تتمركز في وسط الكون، المركز الوحيد لكل الحركات السماوية. ويشكل التفرع الثنائي للكون القفل الثاني؛ فهو مكوّن، من جهة، من العالم الأرضي الذي يمتد من الأرض حتى المدار القمري، وهو عالم التغيرات والزوال والتوالد والفساد، عالم الحركات المستقيمة ـ نحو الأعلى للأجسام الخفيفة كالهواء والنار؛ ونحو الأسفل للأجسام الثقيلة كالتراب والماء. ونجد من جهة أخرى الفضاء، ما وراء مدار القمر، وهو عالم ما هو ثابت، عالم العنصر الخامس، الأثير، عالم النقاوة الدائمة، العالم اللامادي. أما القفل الثالث فهو الحركة الدائرية الدائمة التي كانت تعتبر الحركة الوحيدة الممكنة للأجرام السماوية؛ إنها الحركة الدائرية بالفعل، ولكنها أيضاً ورغم كل شيء الحركة الدائرية بكل ترتيباتها الممكنة بما فيها الخدعة العبقرية لبطليموس التي هي الدائرة ذات نقطة التساوي، وكأنه بذلك يرسم حدود التأثير الأيديولوجي على العلم.

ماذا حلّ بهذه الأقفال بعد نشر كتاب في دوران؟ يُكسر قفل واحد بوضوح، وهو قفل مركزية الأرض. ولكن كوبرنيكوس لا يعلن موقفه من التفرع الثنائي للعالم. غير أن فصل العالم إلى منطقتين مختلفتين تماماً يفقد سنده في نظام كوبرنيكوس الذي يصبح القمر فيه كوكباً تابعاً للأرض: إن مدار القمر الذي يُحبس في داخله عالم التغيّرات يرافق الأرض في دورانها حول الشمس، وبالنتيجة فإن عالم التغيّرات يدخل في كل لحظة عالم الثبات. أما المسلّمة الثالثة، التي تتكلم عن دائرية الحركات السماوية، فإنها تخرج مدعّمة من مؤلف

كوبرنيكوس الذي يفتخر من بين ما يفتخر به أنه ألغى نقاط التساوي كلها.

صحيح أن المكسب يبدو ضئيلاً جداً، ولكن الكون أصبح بفضل كوبرنيكوس متناسقاً. وما من تصدُّع في نظامه، بل هناك صلة بسيطة بين مسافات الكواكب إلى الشمس ومدة دورانها: من مدة دوران عطارد، ثمانية وثمانين يوماً، إلى مدة دوران زحل، ثلاثين سنة، للوصول إلى جمودية كرة الثوابت. وهو ترتيبٌ للعالم يكون فيه لكل الكواكب الوضع الكوني نفسه: فإذا كان التصرف الحركي لعطارد والزهرة يختلف عن التصرف الحركي للمريخ والمشتري وزحل، فإنه ليس من الضروري بتاتاً مقابلة دور الأفلاك الحاملة وأفلاك التدوير لعرض هذا الاختلاف، كما كان يفعله بطليموس، فهذا الاختلاف ليس سوى ظاهرة سببها موقع عطارد والزهرة بين الأرض والشمس. وهناك تبسيط آخر في نظام كوبرنيكوس: تُفسَّر التوقفات والتقهقرات في النظام الشمسي المركز بلعبة حركات الكواكب وحركة الأرض، وتُفك رموز العالم، في مقاربة أولى، من دون أن يتدخل فلك التدوير الأول، فالأفلاك الحاملة تكفي لذلك. وفلك التدوير الكوبرنيكي الأول ليس موجوداً سوى لتنقية دقة التوقّعات وكذلك، نحن نعرف ذلك اليوم، لعرض التباينات بين الحركة الدائرية الذي يُفترض بها أن تصيب الأجرام السماوية، وحركتها الحقيقية الإهليلجية. صحيح أن تأملاً بسيطاً للرسم الذي يعطيه كوبرنيكوس (انظر الرسم 20) والذي لا يتضمن أفلاك تدوير، لا يتيح وضع جداول دقيقة لحركات الكواكب، إلاّ أنه يكفي لفهم البنية العامة للعالم المرئي، في حين أن الرسم نفسه للنظام البطليمي لا يُعلمنا شيئاً عن هذه البنية.



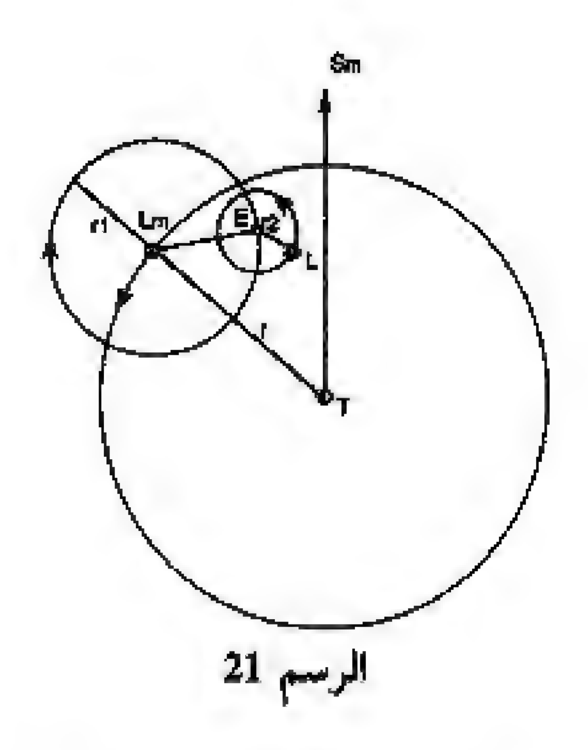
الرسم 20

لقد ذكرنا سابقاً علم الكون عند كوبرنيكوس والديناميكية التي سيؤدي إليها. لنحدد إذاً ما نقصده بهذا التأكيد. في البداية، يُقدّم إدخال حركة الأرض استراتيجية جديدة لعلماء الفلك. وسيكون كبلر أول من سيستخدمها: عندما يدرس حركة المريخ بعد حذف حركة الأرض منها سيكتشف أن هذا الكوكب يرسم إهليلجاً تحتل الشمس أحد مركزيه. ولولا هذا التبيان للصلة البسيطة بين مسافات الكواكب ودورانها لما كان كبلر نفسه سيشعر بالرغبة في تكريس كل ضراوته كحاسب مجنون للبحث عن الصيغة الرياضية لهذه الصلة، من دون أن يكتشف القانون الثالث لحركات الكواكب. ولكن علم الفلك الجديد سيُقوّض، ربما بشكل أكثر عمقاً، علم الفيزياء. لا يمكن لعلم كونٍ أن يكون بريئاً، فقد كان بطليموس يرتكز في عمله للكون على فيزياءٍ، هي فيزياء أرسطو التي كانت قد سبقته بأشواط؛ وكان

المجموع يُشكّل كُلاً بالتأكيد غير خالٍ من الضعف وحتى من التناقضات الجزئية، ولكنه مترابط بالإجمال. ويقترح كوبرنيكوس علم كون جديداً من دون أن يعمل كعالم فيزياء في حين أن علم الكون هذا غير متلائم مع فيزياء أرسطو. ويجد العالِمَ العلمي نفسه أمام علم كون من دون أسس فيزيائية. والمعضلة بسيطة، إما القبول بعلم الكون الجديد لأسباب فلكية أو فلسفية، ونبذ فيزياء أرسطو، وبالنتيجة الاضطرار إلى وضع فيزياء جديدة، وإما الاحتفاظ بالفيزياء القديمة ورفض مركزية الشمس. وهذا سيكون خيار غاليليه. ويعود إلى كوبرنيكوس، وإليه وحده، الفضل في أنه خلق هذا الموقف المنفتح إزاء نظام أرسطو وبطليموس الكُتلوي وأنه أرغم علماء الفلك وعلماء الفيزياء على الاختيار. وسيتبع كلٌ من غاليليه وكبلر سبيلين مختلفين، ولكن سيستثمر كلٌ منهما غنى النظام الجديد. وليس اختيارهما مرجعاً ضعيفاً بالنسبة إلى كوبرنيكوس، فهو يبدو لنا على كل حال أكثر وجاهة من مماحكات البقالة لعدّادي الدوائر الكبيرة أو الصغيرة: وصحيح أن عدد هذه الدوائر أكبر عند كوبرنيكوس منها عند بطليموس، ولكن ليس لها الدور نفسه بالنسبة إلى أغلبيتها.

3. النظرية الكوبرنيكية للقمر

لقد ذكرنا سابقاً أهمية دراسة نظريات حركة القمر عند مؤرخي علم الفلك. يلجأ كوبرنيكوس إلى نظامٍ ذي فلكَيْ تدوير (انظر الرسم 21).



الرسم 21

إن الأرض موجودة في النقطة T. وما نسميه بالقمر المتوسط L_m يتحرك على الفلك الحامل بالنسبة إلى الاتجاه S_m للشمس المتوسطة، في حين أن القمر الحقيقي L يتحرك على فلك التدوير الثاني ذي المركز E. وتتم الحركة على فلك التدوير الأول بالاتجاه المعاكس للحركات على الفلك الحامل وفلك التدوير الثاني. ويبرز في هذا النظام تحسين ملحوظ بالنسبة إلى نظام بطليموس الذي يلغي منه، في آنٍ واحد، نقطة التساوي والتغيرات البعيدة عن الواقع للقطر الظاهر للقمر؛ وقد لاحظ مؤرخو علم الفلك القرابة بين نظام كوبرنيكوس ونظام الشاطر(*) (Le Système d'al-Shâtir) من دون أن يستطيع أحدهم أن يُبيّن طرق الانتقال بينهما.

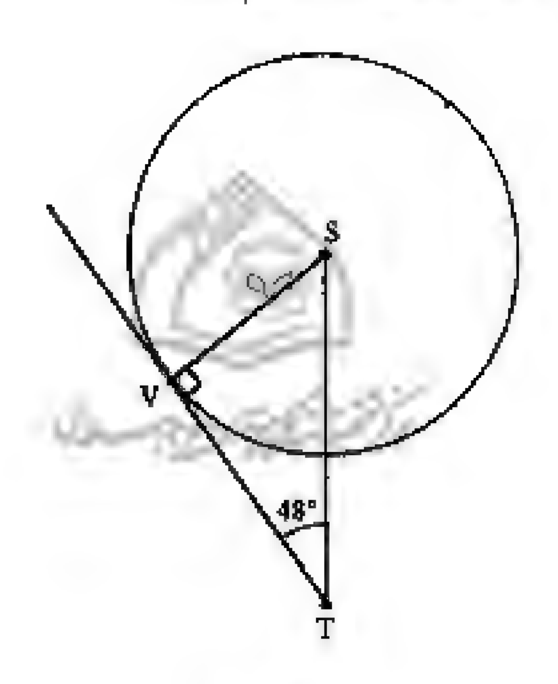
(*) لقد وضع الشاطر كتاباً في علم الفلك يتضمّن افتراض نظام جديد لحركات الكواكب، وقد جعل فيه الشمس مركزها. يتساءل عدد كبير من العلماء ما إذا كان هذا الكتاب المصدر الذي أوحى لكوبرنيكوس بنظرية مركزية الشمس. حول تأثير الشاطر بنظرية كوبرنيكوس، انظر: Edward Stewart Kennedy, «The Arabic Heritage in the Exact Sciences,» *Al- Abhath*, vol. 23, nos. 1-4 (December 1970),

وحول تأثير علم الفلك العربي في الأندلس على ثورة كوبرنيكوس انظر: Juan Vernet, *Ce que la culture doit aux arabes d'Espagne* (Paris: Sindbad, 1985).

4. المسافات في نظام كوبرنيكوس

بالإضافة إلى وجود صلة بسيطة بين المسافات ومدة الدوران في نظام كوبرنيكوس، تصبح المسافات نفسها، التي يُعبّر عنها وفقاً لمسافة الأرض إلى الشمس، سهلة المنال عبر الهندسة البسيطة للنظام، من دون الاستعانة بأي مبدأ وفرة، كما فعل بطليموس.

ولنأخذ كوكب الزهرة كمثال عن حال الكواكب السفلى. يمكن رؤية الشعاع SV لمدارها وفقاً لزاوية أقصاها 48°، وذلك عندما تكون الزاوية SVT قائمة (انظر الرسم 22).

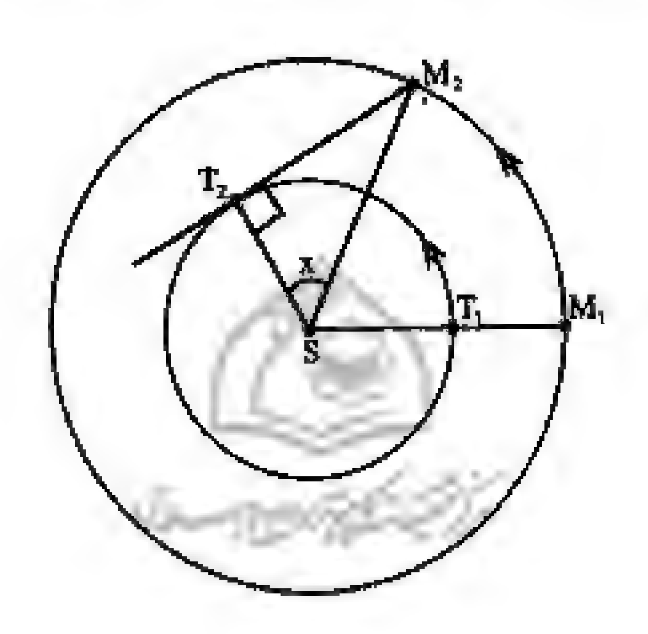


الرسم 22

ويمكننا، بعد أن نرسم هذا المثلث، أن نحدد النسبة SV/ST التي تساوي 0,7؛ وهذا يعني أن مسافة الزهرة إلى الشمس تساوي 0,7 مرة المسافة بين الأرض والشمس.

أما بالنسبة إلى الكواكب العليا، فإن الحلّ أكثر تعقيداً بقليل، ولكنه يبقى بسيطاً. لنأخذ مثل المريخ ولننظر إلى المقابلة $ST_1 M_1$ (انظر الرسم 23) والتربيع الذي يليها $ST_2 M_2$، أي في الفترة التي

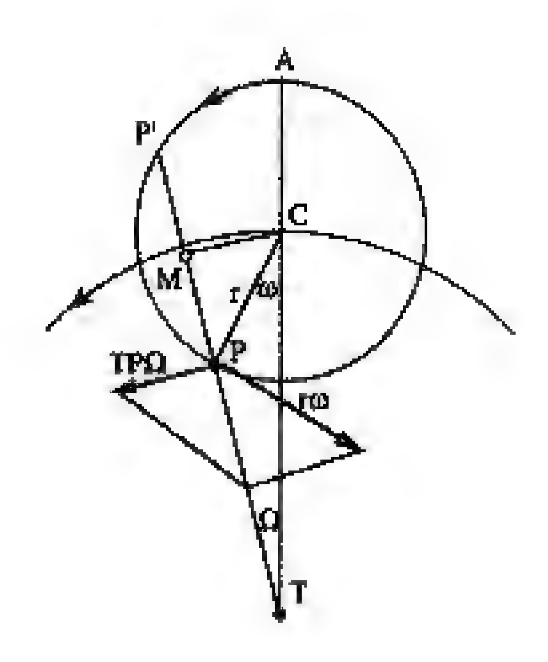
نرى فيها المريخ والشمس في اتجاهين متعامدين. إن الفترة التي تفصل المقابلة عن التربيع تُطلعنا على الزاويتين اللتين دار فيهما كلٌ من كوكبي الأرض والمريخ، الواحد تلو الآخر، حول الشمس خلال المرحلة التي تفصل بين هذين الحدثين. إن الفارق (x) بين هاتين الزاويتين يتيح أن نرسم المثلث ذا الزاوية القائمة ST_2M_2 وأن نقرأ فيهما أيضاً النسبة SM_2/ST_2، أي 1,6. وهذا يعني أن المسافة من المريخ إلى الشمس تساوي 1,6 مرة المسافة من الأرض إلى الشمس.



الرسم 23

5. كوبرنيكوس ونظرية أبولونيوس

في منظور علم الفلك البطليمي، كان فلك التدوير الأول هو الذي عليه أن يبيّن تقهقرات الكواكب (وكذلك التغيرات في المسافات بين الأرض والكواكب). إن الفكرة الأساسية في نظرية بطليموس حول التقهقرات ترجع إلى أبولونيوس وهاكم صيغتها الحديثة (انظر الرسم 24).



الرسم 24

لنفرض أن ω السرعة الزاوية للكوكب على فلك التدوير ذي الشعاع r، وΩ السرعة الزاوية للمركز C على الفلك الحامل ذي الشعاع R.

إذا حددنا في لحظة معينة النقطة C على الفلك الحامل، يكون عندها لـ 'PP السرعة الخطية v.

$$v = r.\omega.$$

على العكس من ذلك، إذا حددنا النقطة P على فلك التدوير يكون عندها لـ P السرعة الخطية V.

$$V = TP.\ \Omega.$$

لكي تكون النقطة P ثابتة عند رؤيتها من T، يجب ويكفي أن يحتوي متوازي الأضلع المكوّن من السرعات v وV على الخط المستقيم 'TPP. وإذا كانت النقطة M في وسط الوتر 'PP، نحصل عندها على ما يلي:

$$\frac{v}{r} = \frac{V}{PM} \quad ou \quad \frac{r\,\omega}{r} = \frac{TP\,.\,\Omega}{PM}$$

أي

$$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{TP}{PM}$$

وهذه علاقة تمثل لحظات التوقّفات التي تؤطّر تقهقرات الكوكب.

وإذا لم يبرهن أبولونيوس نظريته هذه كما برهناها نحن هنا، فلعل ذلك لا يعود إلى كونه لم يكن يستطيع الحصول على هذه النتيجة، انطلاقاً من استدلال من هذا النوع (صحيح أن تركيب السرعات ظهر في علم الميكانيك عند هيرون الإسكندري (Héron d'Alexandrie) الذي جاء بعد أبولونيوس، ولكن متوازي الأضلع الخاص بالسرعات لم يغفل عنه اليونانيون في زمن أبولونيوس، وفق ما يقوله المؤرخ واردن (Waerden)، ولكن ذلك يعود إلى كونه يبحث عمّا هو أبعد من المكان ومن لحظة السرعة الظاهرية المنعدمة: إنه يريد أن يبرهن أن الحركة تكون قبل هذه اللحظة مباشرة وتكون بعدها متقهقرة.

ولا يكتفي بطليموس بنسخ استدلالات قدمها أبولونيوس. إنه يعمم هذه النظرية على حال الفلك الحامل الخارج المركز، ومن دون ذلك ما كان بمقدوره أن يعثر على النقاط الثابتة بمجرد اعتماده على انعدام التساوي الأول بين الحركات ذلك المرتبط بفلك التدوير الأول. بعد ذلك، ينتقل إلى التطبيقات العددية وفي النهاية يضع جداول للتوقّفات الخاصة بمختلف الكواكب.

وفي حين يكرس بطليموس سبعة فصول طويلة من الكتاب الثاني عشر من **المجسطي** لهذه المسألة، لا يخصص كوبرنيكوس لها سوى فصلين قصيرين جداً من الكتاب الخامس. وهذا ما قد يدعو إلى الظن بأن كوبرنيكوس استفاد من اعتقاده بمركزية الشمس الذي

يضفي توضيحاً فريداً على مسألة التقهقرات، فقدّم نظرية جديدة وبسيطة استوحاها مباشرة من نظرية خطوط الطول الخاصة به. إلا أن الأمر ليس كذلك، فكوبرنيكوس يستعيد البدهيات والنظرية من أبولونيوس ويحاول أن يطبقها في حالة الراصد المتحرك. ثم، وفي اللحظة التي ينتقل فيها إلى التعميم الذي قام به بطليموس بشكل رائع، تبوء برهنة كوبرنيكوس بالفشل وينتهي الفصل الأخير من الكتاب الخامس بالفقرة الآتية:

«ومع ذلك، وبما أن الحركة المتغيرة للكوكب وفق مكان الرصد تؤدي إلى صعوبة هائلة وإلى الشك في موضوع التوقفات، وبما أن نظرية أبولونيوس لا تفيدنا في شيء، فإنني أتساءل ما إذا كان من الأفضل أن نبحث بكل بساطة عن التوقفات انطلاقاً من أقرب موقع للكوكب بالنسبة إلى الأرض، تماماً كما نبحث عن اقتران كوكب ما انطلاقاً من القيم المعروفة عن حركاتها بالنسبة إلى خط الحركة المتوسط للشمس وذلك بدمجها معاً. ولكننا ندع لكل شخص، إذا ما أراد، أن يتناول هذه المسألة بالتمحيص».

إن هذا التحول المفاجئ الذي تتسم به هذه الفقرة الأخيرة التي نستشهد بها يعود بالتأكيد إلى تدخّل الشاب ريتيكوس(*) **(Rhéticus)** وهو التلميذ الوحيد الذي اتخذه كوبرنيكوس في حياته والذي قام بزيارته في العام 1539. لقد كان هذا التحول إذاً متأخراً جداً لدرجة

(*) يُعدّ عالم الفلك الألماني جورج جواشيم فون لوشن (George Joachim von Lauchen) الملقّب بريتيكوس (Rhéticus) (1514 ـ 1574) الشخص الذي دفع كوبرنيكوس إلى نشر نظريته حول مركزية الشمس، وقد كان هذا الأخير مصمّماً على نشر جداوله لمواقع الكواكب من دون أن يرفقها بشرح كيفية وضعها. ولكن ريتيكوس استطاع الحصول على إذن كوبرنيكوس بأن يذكر بشكل مجهول نظريته في كتابه *Narratio Prima*. ويُشبّه ريتيكوس كوبرنيكوس بالإله أطلس وهو يحمل الأرض على كتفيه. وفي العام 1540 سمح كوبرنيكوس لريتيكوس بنسخ مخطوطه في دوران الأجرام السماوية.

أنه لم يتبعه تطبيق عملي. وهذا ما نستخلصه من المقارنة بين الطبعة الأصلية لكتاب **في دوران**، من المخطوط المكتوب بخط اليد، والفقرة الموازية له في كتاب *Narratio prima* لريتيكوس. فهذه الفقرة تتسم بأهمية كبيرة لا سيما وأنها تلقي الأضواء على حاجز من الحواجز التي وقفت في وجه الاستعمال المجدي لمفهوم مركزية الشمس، وفي هذه الحالة بالذات غياب المفاهيم الحركية الأساسية: لقد كان مفهوم السرعة محدداً تحديداً سيئاً، أما مفهوم التسارع فقد كان... غائباً كلياً.

II. كبلر

1. مقدمة

ولد جوهان كبلر (Johannes Kepler)، الذي حملت به والدته في 16 أيار/ مايو عام 1571 عند الساعة الرابعة وسبع وثلاثين دقيقة صباحاً، في 27 كانون الأول/ ديسمبر عند الساعة الثانية والنصف من بعد الظهر في فيلدرشتات (Weil der Stadt) بين الرين (Rhin) والغابة السوداء (Forêt-Noire)، بعد حمل دام مئتين وأربعة وعشرين يوماً وتسع ساعات وثلاث وخمسين دقيقة! وهذه الإيضاحات يعطينا إيّاها كبلر بنفسه، كما يعطينا الترددات في كتابة اسمه: إن كبلر (Kepler) وكبلر (Keppler) وخبلر (Khepler) وخيبّلر (Kheppler) وكبلروس (Keplerus)، كلّها منه. كان كبلر ولداً ضعيف البنية، ذا طبيعة هزيلة يعيقه قصر نظر معقّد يجعله يرى الأشياء مزدوجةً في بعض الأحيان، وكان يعاني من ألم في المعدة. نشأ في أسرة مفككة ولكنه كان محظوظاً بأنه ولد وتربّى في وطن وضع فيه دوقات فورتمبرغ (Wurtemberg) نظام تعليم ممتاز. فقد كانوا قد أنشأوا، من بين ما أنشأوا، نظام منح دراسية تمنح لـ «أولاد الفقراء والمخلصين ذوي

الميول النشيطة والتقية والمسيحية». وقد استفاد كبلر من إحدى هذه المنح.

دخل كبلر في 3 أيلول/ سبتمبر عام 1589 إلى جامعة توبنغن (Tübingen). وككل تلميذ يتهيّأ لعلم اللاهوت، كان عليه أن يتلقّى دروس كلية الفنون ليحصل على شهادة الجدارة. وبعد أن تعلّم علم الأخلاق وفن الجدل واللغة اليونانية والعبرية وعلم الفيزياء وعلم الكرويات، رُفّع إلى رتبة الأستاذية في الفنون في العام 1591 وأصبح يحق له التفرّغ لعلم اللاهوت. وبدا أن مصيره قد حُدّد: إنه سيصبح قساً. وبالفعل، ترك كبلر كلية الفنون ليلتحق بكلية اللاهوت التي سيتركها قبل حصوله على لقب دكتور. في نهاية العام 1593، فقدت ولايات ستيريا (Etats de Styrie) عالم الرياضيات لديها جورج ستاديوس (Georges Stadius) فطلبت رأي جامعة توبنغن لاختيار أستاذ جديد. وهناك ما يبعث على الاعتقاد أن كبلر قد لفت الانتباه بفضل مواهبه في علوم الرياضيات، إذ إنّه هو الذي اقترحت جامعته اسمه. وألقى درسه الأول في شتيفتسشول (Stiftsschule) في 24 أيار/ مايو عام 1594. كانت مهماته متواضعة إذ كان مطلوباً منه أن يُدرّس مبادئ علم الفلك لشبان نبلاء بروتستانتيين وأن يضع تقويماً مصحوباً بتوقعات للسنة التالية. وأراد كبلر أن يلفت انتباه تلاميذه الذين كانوا ينفرون من قساوة علم الفلك، فقرر أن يعالج مسائل من علم التنجيم. وقد كان لهذا الخيار أن توصل كبلر، بعد أقل من سنة، إلى الفكرة التي ستسيطر على بقية حياته والتي ستنتج بعض اللُمَع... الضائعة في أطنان من النفايات. إن سبل الاكتشاف أشد غموضاً من سبل الخالق.

2. بنية العالم

في 19 تموز/ يوليو عام 1595 بالتحديد (لقد دوّن هذا التاريخ بنفسه، بفضل اهتمامه المرضي بدقة الأرقام)، وفي الوقت الذي كان

يريد فيه أن يُبيّن لتلاميذه كيف أن الاقترانات الكبرى تقفز فوق ثماني صور من فلك البروج، رسم على اللوح الأسود سلسلة طويلة من المثلثات المحاطة بدائرة، وإذا بفكرة تخطر له فجأةً وبقوة جعلته يمسك بمفتاح أسرار الخلق الهندسية. إنه يقول في مقدمته لطبعة عام 1596 من كتابه **اللغز الكوني** (*Mysterium cosmographicum*): «لن أستطيع أبداً أن أعبّر بالكلمات عن الفرح الذي غمرني به هذا الاكتشاف».

إن التعليم الذي تلقاه من مايكل مايستلين(*) (Michaël Maestlin) في جامعة توبنغن كان قد جعل منه تلميذاً مخلصاً لكوبرنيكوس. فقد وضع قبل ذلك لائحة بالميزات الرياضية الموجودة في نظام كوبرنيكوس والتي تميزه عن نظام بطليموس. وكان يظهر في هذه اللائحة وفي مكان مناسب ذلك الرابط بين أبعاد المدارات وفترات الدوران، وهو رابط لم يكن يعد موضوعاً في صيغة رياضية ولكنه كان واضحاً من حيث الكمية. لماذا هذا الرابط؟ ولكن كذلك لماذا كان عدد هذه المدارات ستة ولماذا كانت توجد هذه المسافات بينها؟ كل هذه الأسئلة كانت تقلق الفتى كبلر منذ عدة سنوات.

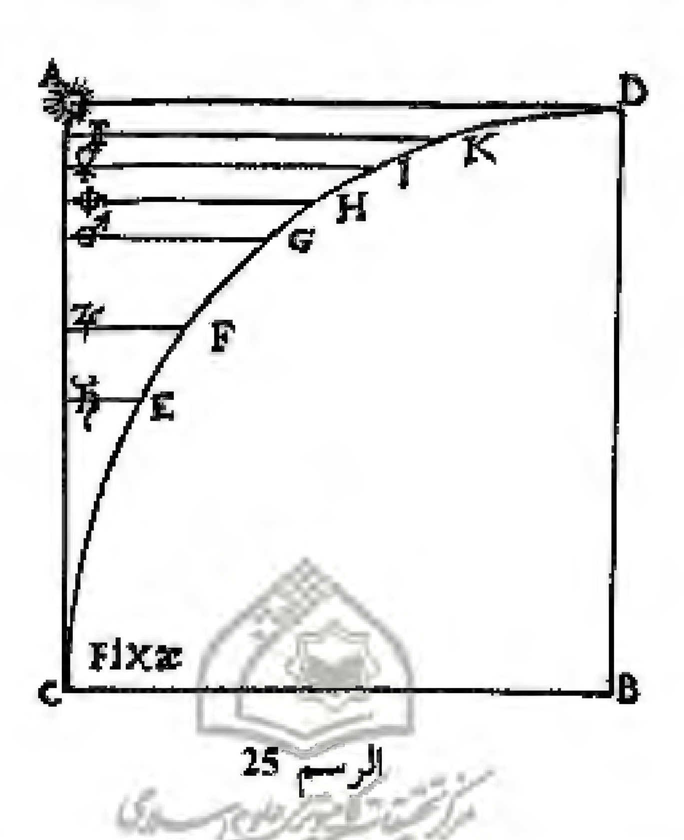
لنتبع إذاً طريقته التي أدت به إلى وضع كتاب **اللغز**. السؤال الأول: ألا يوجد بين أشعة المدارات المتتالية نسبة بسيطة يمكن أن تعبّر عنها أعدادٌ صحيحة أو ألا توجد مثل هذه النسبة بين الاختلافات الكائنة بينها؟ هذا بحث لا جدوى منه. سيكرّس له كبلر

(*) كان مايستلين من مؤيدي نظرية كوبرنيكوس التي تقول بدوران الكواكب حول الشمس. وقد قبل تلميذه كبلر نظرية مركزية الشمس هذه على الفور، اعتقاداً منه بأن بساطة ترتيب الكواكب في النظام الكوبرنيكي لابد وأنها من تنظيم الله.

الكثير من «الوقت كما لو كان لعبة» نظراً إلى أن أي انتظام لم يظهر لا في النسب بين المدارات ولا في اختلافاتها ونظراً إلى أنه لم يحصل منها على أي فائدة سوى أنه طبع بعمق في ذاكرته المسافات نفسها كما كان يدرّسها كوبرنيكوس. إذاً بما أن كبلر لم يحصل على أي نتيجة من هذه الطريق فقد ذهب إلى اكتشاف طريق أخرى ومن دون جدوى كذلك: لقد أدرج كوكبين لا نستطيع رؤيتهما لشدة صغرهما بين المشتري والمريخ وكذلك بين الزهرة وعطارد. وأعطاهما بالإضافة إلى ذلك فترة دوران إذ كان يعتقد أنه بذلك يضفي شيئاً من الانتظام على النسب بين المدارات. إلا أن هذه الطريقة صدمته منذ البداية، إذ لا يمكنه أن يقوم بتكهنات منطقية حول نبالة أي عد يمكنه أن يحدد عدد الكواكب الموجودة بين الشمس وكرة الثوابت. ويبدو له، بالإضافة إلى ذلك، أنه من الأفضل اعتبار أن الله قد وضع خريطة العالم على نسب بنيوية هندسية بدلاً من اعتباره قد وضعها على نسب عددية، إذ إن الأعداد هي أشياء جاءت بعد ولادة العالم. ونحن نصل هنا إلى حدود النظرية الفيثاغورية التي غالباً ما أبرزها كبلر: وبالنسبة إليه، وكما يظهره ألكسندر كويري (Alexandre Koyré)، لا يمكن للأعداد أن تكون بارزة بصفتها أعداداً، فهي دائماً عدد لشيء ما. وعبر البحث عن نسبة عددية أكثر تعقيداً بقليل، سيُدخل كبلر في بحثه الهندسة والفيزياء.

لنسمع ما يقوله كبلر بنفسه: «وفتشت من جديد بطريقة أخرى، وأنا أتساءل إذا لم تكن، على ربع الدائرة نفسها، مسافة كوكب ما تساوي باقي جيب الزاوية، في حين تكون حركتها تساوي باقي جيب المتمّم. لنتخيل مربعاً AB مرسوماً على AC، نصف قطر الكون بأكمله (انظر الرسم 25). ولنرسم بشعاع BC، ابتداءً من رأس الزاوية B المقابلة للشمس أو لمركز العالم A، ربع الدائرة CED. ثم

لندوَن، على الشعاع الحقيقي للعالم، أي على AC، الشمس والثوابت والكواكب وفقاً لمسافاتها. ولنرسم ابتداءً من هذه النقاط خطوطاً مستقيمةً حتى تقاطعها مع ربع الدائرة المقابلة للشمس.



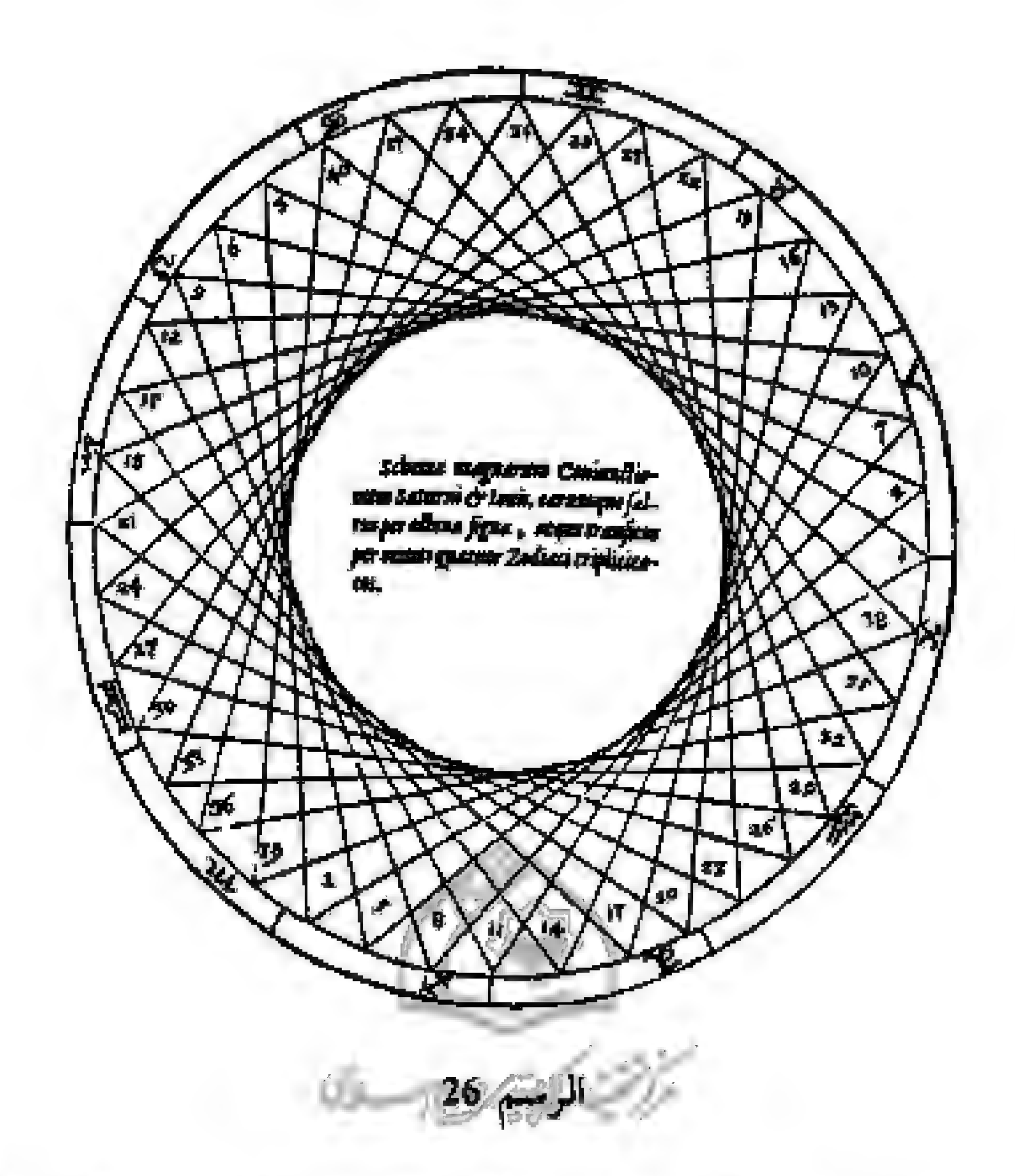
الرسم 25

«وافترضت عندها أن هناك النسبة نفسها بين القوة التي تحرك الكواكب وبين قطع الخطوط المتوازية. في حال الشمس، إن الخط AD لامتناهٍ، إذ إن AD يلمس ربع الدائرة ولا يقطعه. إذاً توجد في الشمس قوة محركة لامتناهية: وبالفعل فإن الشمس ليست سوى حركة من حيث عملها بالذات. وفي حال عطارد، يُقطع الخط اللامتناهي في K: ولهذا يمكن مقارنة حركته إذّاك بحركة الكواكب الأخرى. أما في حال الثوابت، فإن الخط غير موجود قطعياً ويقتصر على النقطة C وحدها: ولا توجد هنا بالنتيجة أي قوة محركة. هذه هي النظرية التي كنت أنوي أن أدرسها بواسطة الحساب. وإذا اعتبرنا أن هناك شيئين كانا ينقصانني: لقد كنت أجهل، من جهة، قيمة الجيب الإجمالي، أي قياس ربع الدائرة المُقتَرح، ولم يكن مُعبّراً

عن قوة الحركات، من جهة أخرى، سوى حسب نسبة حركة إلى أخرى - وإذا أخذنا إذاً بعين الاعتبار، كما قلت، هاتين الشائبتين، سنشك بحق بالاحتمالات التي كنت أملكها للوصول إلى أي شيء عبر هذه الطريق الصعبة. ومع ذلك، فقد لزمني عملٌ طويلٌ وعددٌ كبيرٌ من الروحات والغدوات بين القوس والجيب لكي أفهم أن هذه الفكرة لا يمكن أن تصمد»[1].

هذا فشل جديد كان ليحبط أي عالم فلك غير كبلر. وستتدخل عندها حادثة 19 تموز/ يوليو عام 1595 على أرض مهيئة بشكل جيد، في حين أن الصيف كان قد «ضاع تقريباً بالكامل في تحمّل هذا الهمّ». كان كبلر قد أحاط عدداً كبيراً من المثلثات بدائرة واحدة، أو بالأحرى أشباه مثلثات إذ إن نهاية الواحد منها كانت تشكّل بداية التالي (انظر الرسم 26). والنقاط التي كانت تتقاطع عندها أضلاع المثلثات بالتبادل كانت ترسم شكل دائرة أصغر مرتين من الدائرة الأولى. وكانت النسبة بين هاتين الدائرتين تبدو بالعين مشابهة تقريباً للنسبة الموجودة بين مدار زحل ومدار المشتري. وإضافة إلى ذلك، إن المثلث هو أول الأشكال، كما زحل والمشتري هما أول الكواكب، فلمعت فكرة في رأسه... ولكن في طريق جديدة خاطئة!

(1) انظر: Johannes Kepler, *Le Secret du monde*, science et humanisme, introduction, traduction et notes de Alain Segonds (Paris: Les Belles lettres, 1984).

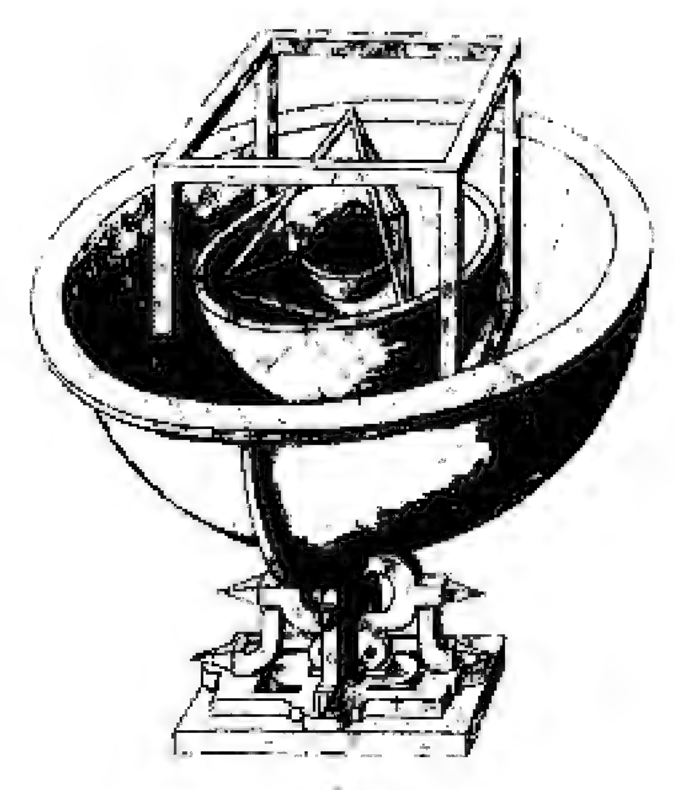


الرسم 26

وحاول على الفور تحديد المسافة بين المشتري والمريخ بواسطة المربع، والمسافة بين المريخ والأرض بواسطة الخماسي، والمسافة بين الأرض و الزهرة بواسطة السداسي، والمسافة بين الزهرة وعطارد بواسطة السباعي. غير أن نتيجة هذه المحاولة غير المثمرة كانت منطلقاً للمجهود الأخير لكبلر، وهو مجهود سيجد فيه ما يرضيه.

حلل كبلر أسباب هذا الفشل الأخير، وهو واثق أنه يملك مفتاح سر العالم. إذا اتبع تسلسل الأشكال، فإنه لن يصل أبداً إلى الشمس ولن يحصل أبداً على السبب وراء عدد المدارات: لماذا هي ستة مدارات بدلاً من عشرين أو مئة؟ سيبدأ إذاً من الأرض،

وسينتقل من الهندسة المستوية إلى الهندسة الفضائية التي بإمكانها أن تعبّر أكثر عن بنية العالم، ولن يستعمل، لسد الفضاءات الخمسة التي تفصل بين المدارات الستة، سوى متعددي السطوح الخمسة المنتظمة التي برهن إقليدس في الملاحظة التي تلي القضية الثامنة عشرة من الكتاب الثالث عشر من كتاب **المبادئ** أنه لا يمكن أن يكون هناك أكثر من خمسة. ويمكننا على كل حال أن نندهش من انتقال كبلر المتأخر كثيراً من العدد اللامتناهي من المضلّعات المنتظمة الممكنة إلى متعددي السطوح الخمسة التي كان يعلم أن بلوتارخوس المزيّف (Pseudo-Plutarque) كان ينسبها في **آراء فلاسفة** (*De placitis*) إلى الفيثاغوريين، وأنها كانت مرتبطة في ما مضى، في زمن أفلاطون، إن لم يكن ببنية العالم فبعناصره: من الممكن أن تكون الأرض قد خُلقت من المكعب، والنار من الهرم، والهواء من ثماني الأوجه، والماء من ذي العشرين وجهاً، وكرة الكلّ، أي الأثير، من ذي الاثني عشر وجهاً. بالنسبة إلى كبلر سينظّم العالمَ متعددو السطوح المنتظمة الخمسة: لقد أدخل المكعب بين كرة زحل وكرة المشتري، ثم أدخل رباعي الأوجه بين كرة المشتري وكرة المريخ، ثم ذا الاثني عشر وجهاً بين كرة المريخ ومدار الأرض الكبير، ثم ذا العشرين وجهاً بين كرة الأرض وكرة الزهرة، وأخيراً أدخل ذا ثماني الأوجه بين الزهرة وعطارد (انظر الرسم 27). وتكمن المعجزة في التوافق الذي إن لم يكن كاملاً فإنه في كل الأحوال مقبول بين الأشعة المتتالية للكرات المحاطة والمحيطة بالمتعددي السطوح المنتظمة إذا أُخذت بهذا الترتيب من جهة والمسافات النسبية للكواكب إلى الشمس في نظام كوبرنيكوس من جهة أخرى.



الرسم 27

كرة زحل.

مكعّب، وهو أوّل الأجسام المنتظمة في الهندسة، يدلّ على المسافة بين مدار زحل ومدار المشتري.

كرة المشتري.

رباعيّ الأوجه، أو الهرم، وهو يمسّ من الخارج كرة المشتري ومن الداخل كرة المريخ، وهما المسؤولتان عن أكبر مسافة بين الكوكبين.

كرة المريخ.

ذو الاثني عشر وجهاً، وهو الجسم الثالث، ويمثّل المسافة التي تمتدّ من كرة المريخ حتى المدار الكبير الذي يحمل الأرض مع القمر.

المدار الكبير.

ذو العشرين وجهاً، الذي يدلّ على المسافة الحقيقية بين المدار الكبير وكرة الزهرة.

كرة الزهرة.

ذو ثماني الأوجه، الذي يُبيّن المسافة بين كرة الزهرة وكرة عطارد.

كرة عطارد.

الشمس، الوسط أو المركز الثابت للكون.

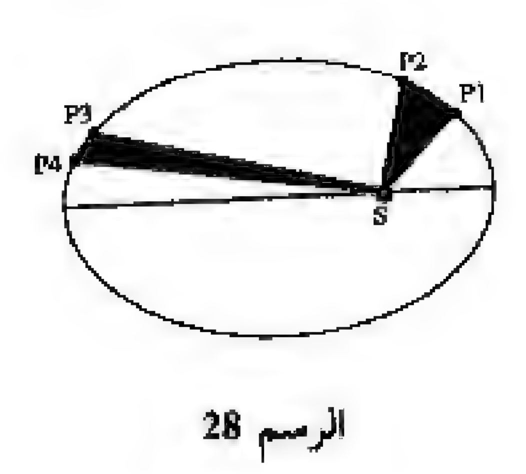
يعرض أبعاد مدارات الكواكب ومسافاتها بواسطة الأجسام المنتظمة الخمسة في الهندسة، وهو مهدى إلى سمو الأمير والمولى، السيد فريدريك دوق فورتمبرغ وتيك (Teck)، وكونت مومبلغارت (Mumpelgart).

لن يحتفظ علم الفلك بشيء من كتاب **اللغز الكوني**، ولكن تطبيق الضراوة الحسابية المجنونة نفسها، والبحث العنيد نفسه عن الأسباب، على الأرصاد التي جمعها تيكو براهي(*) (Tycho Brahe) سيفضي، بعد مرور عشرين سنة تقريباً، إلى القانون النظري الثالث لحركات الكواكب.

3. القوانين الثلاثة لحركات الكواكب

كان القانونان الأولان لمدارات الكواكب قد نُشرا عام 1609 في **علم الفلك الحديث** (*Astronomie nouvelle*)، وهو مؤلَّف مُكرَّس لكوكب المريخ.

يحدد القانون الأول طبيعة المدارات: تدور الكواكب في مدارات إهليلجية تقع الشمس في إحدى بؤرتيها. أما القانون الثاني فإنه يحدد طريقة اجتياز المدارات: إن المتجه النصف قطري الذي يصل الكوكب بالشمس يمسح مساحات متساوية في أوقات متساوية (انظر الرسم 28).



الرسم 28

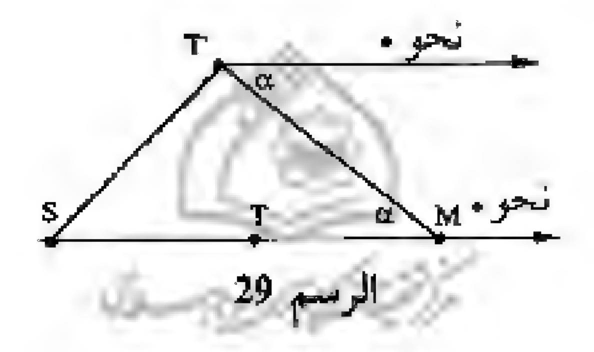
(*) ورث كبلر جميع الإنجازات الرصدية لتيكو براهي إذ كان يعمل كمساعد له في مرصده.

أما القانون الثالث فلن يُنشر إلاّ في العام 1618 في كتاب **تناسق الكون** (*Harmonies du monde*). يُعبّر هذا القانون حسابياً عن الصلة التي استشفّها كوبرنيكوس نوعياً بين مدد الاجتياز وقياسات مدارات الكواكب. وهو يُنسّق النظام كله، وكان من المفترض منه أن يزيل التحفّظات الأخيرة تجاه النظام الشمسي المركز. ويُصاغ هذا القانون كما يأتي: إن مربّعات أزمنة الدوران تتناسب مع مكعبات المسافات المتوسطة من الكواكب إلى الشمس. وهذا يعني أنه إذا أشرنا بـ (T) إلى الدوران النجمي وبـ (*a*) إلى المسافة المتوسطة لكوكب، يصبح لدينا a^3/T^2 = ثابت لكل الكواكب. ويلاحظ كبلر في كتابه **خلاصة في فلك كوبرنيكوس** (*Epitome*) الذي نُشر عام 1618، أن قانونه ينطبق على أقمار المشتري الأربعة، ولكن الثابت ليس نفسه. بالإضافة إلى الاستعمال الذي سيقوم به نيوتن، اتّخذ هذا القانون أهمية أساسية: إنه يسمح بوزن الأجرام السماوية التي لديها أقمار، وذلك لأن الثابت يتناسب مع كتلة الجسم الرئيسي.

لنتفحص اكتشاف القانونين الأولين. كانت المسألة هي الآتية: إننا نرى الشمس والكواكب من الأرض في اتجاهات معينة بالنسبة إلى النجوم؛ وهذه الاتجاهات تختلف من يوم إلى آخر، كُلّما رسمت الأرض منحنى مجهولاً حول الشمس ورسمت الكواكب كذلك منحنيات مجهولة حول الشمس؛ جد مسار الأرض. ولعدم وجود قاعدة ثابتة، بالمعنى الجيوديسي، فقد كانت صعوبات هذه المسألة تبدو وكأنه لا يمكن التغلّب عليها. ولكن كبلر استطاع أن يجد أساس التثليث هذه.

عندما يكون المريخ والشمس متقابلين (انظر الرسم 29)، يتوافق اتجاه النظر TM مع الخط المستقيم SM: ليكن X النجم الذي يُجسّد هذا الاتجاه. يكمل المريخ مداره خلال ستمئة وسبعة

وثمانين يوماً ويعود إلى M، وتعود القاعدة SM عندها إلى حجمها واتجاهها الأساسيين، ويصبح SMX على خط واحد من جديد. ولكن الأرض تحتل، بعد انقضاء هذا الوقت، الموقع T'، ويُمكّن رصد المريخ في هذه الفترة من معرفة الزاويتين المكونتين عند T'. يمكننا أن نرسم المثلث SMT'، مع ضلع SM اعتباطي. وبعد انقضاء ستمئة وسبعة وثمانين يوماً آخر، سنتمكن من رسم موقع جديد T'' للأرض مع الضلع SM نفسه، وهكذا دواليك. ومع سلسلة من n أرصاد، سيصبح لدينا n مواقع صحيحة للأرض وسنتمكن من البحث بالتجربة عن المدار الذي يمكنه أن يحتوي على هذه الـ n نقاط.



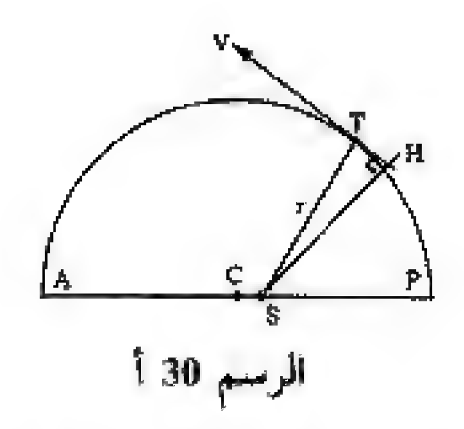
الرسم 29

وبحث كبلر في السجلات التي دوّن فيها تيكو براهي أرصاد حياته بأكملها عن سلسلة أرصاد للمريخ تتباعد بنحو 687 يوماً، لأنه كان يعرف الاستفادة من الفترات القريبة. وهكذا توصّل إلى رسم مدار صحيح للأرض، فقد وجد أن دائرة C بعيدة عن المركز بالنسبة إلى الشمس 0,018 (أُخِذ شعاع الدائرة كوحدة) تناسب كل سلسلات الأرصاد. وهذه النتيجة ممتازة، ولا يجدر بها أن تدهش وذلك لأن الاهليلج الأرضي يختلف قليلاً عن الدائرة (إذا أخذنا كصورة عن هذا المدار دائرة يبلغ شعاعها متراً، فإن الإهليلج الصحيح لن يبتعد أبداً أكثر من عُشرَي مليمتر). ولكن الشمس S تقع في هذه الدائرة على بعد 1,7 سم عن المركز C. إذاً إن الاختلاف المركزي الذي

وجده كبلر كان صحيحاً جداً، إذا ما فكّرنا أن جميع الأقدمين منذ هيبارخوس، وكوبرنيكوس وتيكو براهي كانوا قد اختاروا واستخدموا في حساباتهم قياسات تساوي الضعف تقريباً.

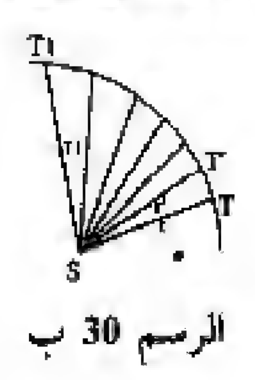
شكّل هذا الاكتشاف الباهر قاعدة انطلاق القانونين الأولين. فقد انقض كبلر، وهو يملك المسار الصحيح للأرض، على طريقة اجتيازها لمدارها، ووجد، من خلال خطأين متكافئين، قانون المساحات. لقد تم إذاً وضع القانون الثاني قبل الأول، ولم يعن في البداية بالإهليلج، بل بالدائرة البعيدة عن المركز. وعندما سيكتشف كبلر لاحقاً مدار المريخ الاهليلجي، سيطبق عليه قانونه عن المساحات وسيلاحظ أنه يعطي المواقع الصحيحة وسيعتبر عندها أن هذا القانون قد وُضع بشكل كافٍ.

إنه تسلسل سعيد من الأخطاء الذي سيوصله إلى قانونه عن المساحات. وبالنسبة إليه، تكمن القوة المحركة في الشمس. وهي ذات طبيعة مغنطيسية وتنتج عن دوران الشمس على نفسها. وتُمارَس القوة تماسياً على المسار، فالكوكب سيتوقف إذا لم يكن من قوة تدفعه باستمرار. ونرى كم يخطئ الذين نسبوا إلى كبلر الدور الحاسم في اكتشاف مبدأ العطالة (أو السكون). إذا كان r المسافة من الشمس إلى الكوكب، فإن القوة المحركة تتغيّر في نسبة عكسية من r، وكذلك سرعة الجرم السماوي حسب اعتقاد كبلر. غير أن السرعة تتغير في نسبة عكسية من SH وليس من ST (انظر الرسم 30 أ). ولكن SH وST يتطابقان عندما يمر الكوكب في النقطة A أو في النقطة P (القبوان). بيد أن كبلر اكتفى بالتأكد من قانون السرعة عند مرور الكوكب عند القبوين، وبالنتيجة فإن الخطأ لم يظهر له قط.



الرسم 30 أ

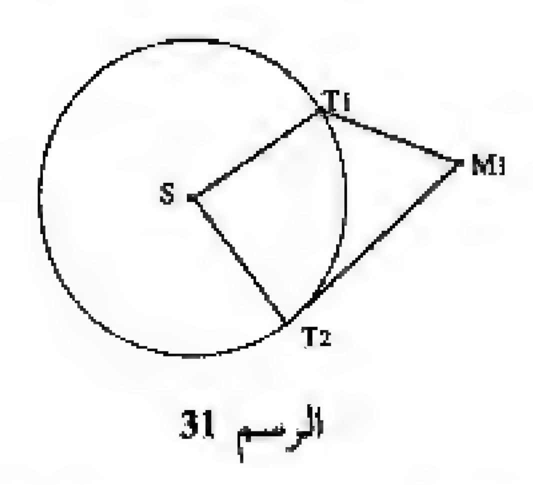
ولكن خطأً ثانياً جاء ليلغي أثر الخطأ الأول. فقد اعتقد كبلر أن السرعة في T تتناسب عكسياً مع ST (انظر الرسم 30 ب)، فاستنتج بحق من ذلك أن الزمن المطلوب لاجتياز قوس قصير جداً TT' يتناسب مع ST. أما اجتياز قوس أطول TT_1 فيتطلّب زمناً يتناسب مع مجموع الأشعة $(ST + ST' + ... + ST_1)$. غير أن كبلر يستبدل مجموع الأشعة بمساحة القطاع. إن استبدال طولٍ بمساحةٍ هو لخطأ فادح، ولا يجهل كبلر ذلك، ويعترف به. ولكن بما أن قانون المساحات قد اتضح أنه مطابق للظواهر، احتفظ به كبلر صواباً، رغم أنه لم يكن يستطيع أن يبرهنه بشكل أفضل.



الرسم 30 ب

وعاود كبلر دراسة المريخ بعد أن أصبح لديه مدار أرضي ممتاز والقانون الحقيقي لمساره. والطريقة التي اتبعها حسابية بحتة، ولكننا سنعطيها شكلاً تصويرياً للتسهيل. لنأخذ رصدين للمريخ يفصل بينهما ستمئة وسبعة وثمانين يوماً يكون المريخ خلال هذه الفترة قد عاد إلى الموقع نفسه M_1 من النظام الشمسي في حين أن

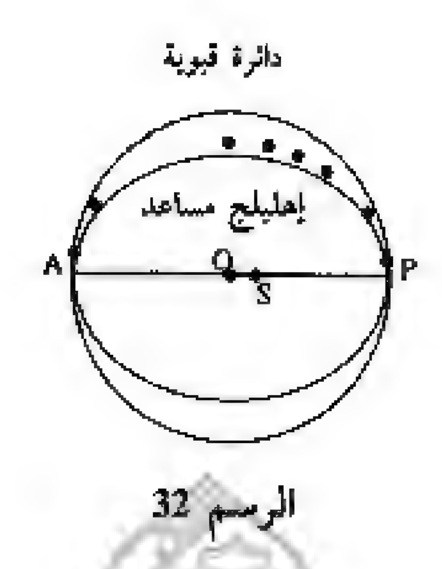
الأرض تحتل موقعين مختلفين T_1 وT_2 يسهل تحديدهما (انظر الرسم 31).



الرسم 31

يتقاطع اتجاها نظر في كل تاريخ من التاريخين عند النقطة المطلوبة M_1. وإذا أعدنا هذه العملية n مرة، نحصل على n نقطة، M_1، M_2 ....M_n، التي ترسم المسار المطلوب. وفي الحقيقة، حاول كبلر في البداية رسم دائرة. وحدد بنقاط قريبة من القبوين عناصر دائرة مختلفة المركز، وحسب تباين المواقع الأخرى بالنسبة إلى هذه الدائرة، فوجد عند بعض النقاط تبايناً غير مقبول من ثماني دقائق قوسية (في حين أن دقة الأرصاد تساوي دقيقتين قوسيتين) وبدأ يشكّ بالدائرة. وبما أن النقاط كانت تقع بشكل منظّم داخل دائرة قبوية، تصوّر كبلر أن المسار يجب أن يكون بيضاوي الشكل، ورآه في البداية على شكل بيضة، مروّساً عند الحضيض. ولكن تطبيق طريقة المساحات صعبة في هذا الشكل البيضوي، واكتشف أن الأمور ستكون أسهل لو أن هذا الشكل البيضوي كان إهليلجاً! وليقوم بالتقديرات، استبدل الشكل البيضوي بإهليلج مساعد (انظر الرسم 32)، مفلطح كفاية، لا تشغل الشمس إحدى بؤرتيه. ولكن هذه المحاولة الجديدة أعطته أخطاء من الحجم نفسه، ولكن ذات أثر معاكس، فالمدار الحقيقي يقع بين الدائرة القبوية والإهليلج المساعد. ويساوي التفاوت بالضبط نصف الهلالية، ويرى كبلر، بالصدفة

حسب قوله، أنه يتطابق مع إهليلج تكون الشمس في إحدى بؤرتيه. «استيقظت كما من سبات عميق، وهبط عليّ ضوء جديد». وكان الاكتشاف الجديد قد تم، ونجحت كل الحسابات التالية بشكل رائع. لقد تم ربط المريخ.



الرسم 32

وبفضل القوانين الثلاثة، ظهر النظام الشمسي ببساطته التامة، وأُفنيت أفلاك التدوير والأفلاك الخارجة المركز إلى الأبد، وهُزم مبدأ الحركة الدائرية والمنتظمة.

III. غاليليه

في 21 آب/ أغسطس عام 1609، تسلّق كل أعضاء مجلس شيوخ البندقية برج سان مارك وأمعنوا النظر في البحيرة الشاطئية، وذلك تلبيةً لدعوة غاليليه الذي كان قد أنهى أول منظار له. إن المراكب الشراعية التي تقترب والتي تتراءى لأعضاء مجلس الشيوخ من خلال هذا «الأنبوب البصري»، عليهم أن ينتظروا ساعتين أو أكثر لكي يستطيعوا رؤيتها بالعين المجرّدة. يعرف غاليليه، منذ 26 آب/ أغسطس، أنه سيُكافأ، وإذا اتضح أن الحكومة ستكون أقل سخاء من المُتوقّع... إذ لن تتم زيادة أتعابه إلاّ في نهاية السنة، فإنه حاز مدى

الحياة على منصب أستاذ الرياضيات الذي كان يشغله في بادوا (Padoue) والذي يتبع لجمهورية البندقية. وفي نهاية شهر تشرين الثاني/ نوفمبر أنهى غاليليه منظاراً جديداً بقوة عشرين، في حين لا تبلغ قوة المنظار الذي كان قد عرضه على الدوج (doge) سوى ثمانية. ذلك هو المنظار الذي سيستخدمه غاليليه في 30 تشرين الثاني/ نوفمبر عام 1609 بعد مغيب الشمس بقليل، ليقوم برصد ورسم القمر ذي الأربعة أيام. وواصل رصده له حتى مغيبه، وقام برسم ثانٍ وتابع تَقدّم شروق الشمس في منطقة جانسين فابريسيوس (Janssen-Fabricius). ورصد في 2 كانون الأول/ ديسمبر القمم المسنّنة للجبال التي تحيط ببحر السيرينيتاتيس (Sérénité)، ولاحظ في 3 كانون الأول/ ديسمبر أن «التيرميناتور» يقطع فوهة البتاني(*). ثم يجب انتظار يومي 17 و18 كانون الأول/ ديسمبر لكي يُسجّل رصدين جديدين للفوهة، ويوم 7 كانون الثاني/ يناير 1610 لكي يبدأ برصد المشتري ولكي يلاحظ أن هذا الكوكب ترافقه «ثلاثة نجوم». و قد لاحظ في 8 كانون الثاني/ يناير أن هذه النجوم تلحق المشتري في مساره؛ وفي التاسع، تلبدت السماء ولم يستطع غاليليه القيام بالرصد؛ وفي العاشر، وجد من جديد المشتري وأقماره الثلاثة. واكتشف في الثالث عشر قمراً رابعاً للمشتري: ويبدو رفاق الكوكب الأربعة وكأنهم يدورون حوله في الوقت نفسه الذي كانوا يرافقونه في مساره. ويبدأ غاليليه في 16 كانون الثاني/ يناير بكتابة **الرسول السماوي** (*Sidereus nuncius*) وتابع الرصد إذ أنه سيدرج في هذا المؤلَّف أرصاداً حتى 2 آذار/ مارس، إذ إنه تلقى في 1 آذار/ مارس

(*) تقع فوهة البتاني القمرية على الوجه المرئي من القمر. وقد أطلقت الجمعية الفلكية العالمية عليه هذا الاسم في العام 1935 تيمُّناً بعالم الفلك العربي محمد بن جابر بن سنان البتاني (858 ـ 929).

الإذن بالنشر. وفي 12 آذار/ مارس كان الكتاب قد انتهى، وفي 19 بعث غاليليه بنسخة منه إلى كوزيمو الثاني(*) (Cosme II de Médicis).

هنا تبدأ ثورة جديدة. خلال بضع عشرات من الليالي، ظهر أمام عيني غاليليه عالم غير مُتوقَّع. واكتشف الطبيعة الحقيقية لدرب التبانة، والجبال القمرية، وأقمار المشتري وأوجه الزهرة، وفي وقت لاحق الكلف الشمسي ودوران الشمس، والشكل المعقد لزحل ولحلقته. ومن بين هذه الظواهر هناك ثلاث منها على الأقل تشهد لصالح كوبرنيكوس أو على الأقل ضد بطليموس وأرسطو، ولكنها لا تستطيع أن تبتّ بين كوبرنيكوس وتيكو براهي. في البداية تُظهر حركة أقمار المشتري أن الأرض ليست المركز الوحيد لكل الحركات السماوية: إذ يوجد على الأقل مركز ثانٍ، هو المشتري، وتدور حوله أربعة أقمار. وبالإضافة إلى ذلك، أظهرت الدراسة المطوّلة لهذا النظام المشتروي أن الأقمار تدور في دائرة، بانتظام حول المشتري، من دون أن نرى أي مسارات دويرية. وهذا النظام هو صورة عمّا كان ليكون عليه نظام كوبرنيكوس المثالي. وكانت هذه الملاحظة قد دحضت كذلك أحد اعتراضات أولئك الذين كانوا يريدون الأرض أن تكون ثابتة: وإذا كانت الأرض تدور على مدار فإن القمر الذي يدور حولها ستحرّكه حركتان، وهذا كان يبدو مستحيلاً. غير أن المشتري كان يُرى وهو يتحرك من دون شك جاراً معه أقماره الأربعة(**).

(*) كوزيمو الثاني (1590 ـ 1621): هو غراندوق توسكانا، حكم بين العامين 1609 و1621.

(**) وهذه الأقمار الأربعة التي اكتشفها غاليليه سُمّيت باسمه، وهي تُدعى اليوم باسم أقمار غاليليه (Les Lunes galiléennes).

وفي حين كان على الزهرة أن تحافظ دائماً، وهي مرئية من الأرض بوجهها المظلم، على شكل هلال في نظام بطليموس، رأى غاليليه الزهرة تجتاز مساراً كاملاً من الأوجه وتعرض بالأخص عند بعض الاقترانات قرصاً مضاء بالكامل: وهذه الظاهرة تُبطل علم الكون البطليمي.

وأخيراً كانت الأجرام السماوية تعتبر أنها كروية تماماً، من دون شوائب، غير قابلة للفساد. بيد أن غاليليه اكتشف تضاريس القمر المذهلة: الجبال (التي قدّر ارتفاعها بسرعة عبر دراسة ظلالها المسقطة)، والوديان والفوهات. إن الأرض القمرية هي على الأقل غير متساوية بقدر سطح الكرة الأرضية، وموادها لا تبدو أبداً من ماهية مختلفة عن ماهية مواد الأرض. كما يأتي اكتشاف الكلف الشمسي ليتعارض مع النقاء الذي نُسب إلى الأجرام السماوية. ولنذكر أن غاليليه ليس أول من رصد الكلف الشمسي، وليس أول من أكّد بأنها ليست حواجز موجودة بيننا وبين الشمس، وبأنها موجودة على الجسم نفسه للجرم. إذ إن ثلاثة علماء فلك سبقوه بقليل وهم: توماس هاريوت (Thomas Harriot) وكريستوف شاينر (Christophe Scheiner) وجوهان فابريسيوس (Johann Fabricius). ويبدو أن أولوية الأرصاد تعود إلى هاريوت، ولكن فابريسيوس هو أول من نشر وأعطى تفسيراً صحيحاً لهذه الظاهرة: فقد أُرّخت مقدمة كُتيّبه عن الكلف الشمسي بتاريخ 13 حزيران/ يونيو عام 1611، وطُبع الكتاب في خريف السنة نفسها. ثم تأتي **رسائل حول الكلف الشمسي** (*Lettres sur les taches solaires*) لشاينر، وبعدها رسائل غاليليه التي نُشرت عام 1613. ويبقى أن دقة ووضوح برهان طبيعة الكلف الشمسية الذي قدّمه غاليليه يجعلان من **رسائل تتعلق بالكلف الشمسي** (*Lettres concernant les taches solaires*) واحدة من أفضل

مؤلفات عالم الفيزياء الكبير هذا، وتشكلان مع برهان خشونة الأرض القمرية، نموذجاً من نوعه. ويبرهن غاليليه في هذا المؤلف أن سبب الكلف لا يمكن أن يكون الكواكب الصغيرة كما كان يعتقده شاينر، بل أن الكلف إن لم يكن على سطح الشمس نفسه، فإنه في أي حال قريب جداً منه. ويمكننا أن نقتنع بذلك عبر رصد هذه البقع وهي ترافق الشمس في دورانها، ورؤية شكلها يتغير تدريجياً حتى تضمحل ـ وذلك تحت تأثير المنظور ـ قبل أن تختفي وراء الجرم السماوي. أضف إلى ذلك أن غاليليه أعلن في كتاب **الرسائل** ولأول مرة كتابياً عن اقتناعاته الشمسية المركز.

ولكن غاليليه قبل كل شيء عالم فيزياء سيؤسس علم الميكانيك الكلاسيكي. وتقول أسطورة يعرفها الجميع أن غاليليه اكتشف تواقُت الذبذبات الصغيرة لرقاص الساعة عندما راقب تأرجح ثريا كاتدرائية بيزا، وعندما قام بقياس فترة تذبذبها بمقارنتها مع خفقان نبضه. ولكن تجاربه حول سقوط الأجسام أكثر شهرة. وقد بدأها في بيزا عام 1591، عندما لاحظ ببساطة أن أوقات سقوط الأجسام مستقلة عن وزنها. ولكن غاليليه سيقوم في بادوا، ابتداء من العام 1592 وحتى العام 1610، بالتجارب على المستوي المائل التي ستقوده إلى اكتشاف قانون سقوط الأجسام تحت تأثير الجاذبية الأرضية، وإلى عرض مبدأ العطالة، وإلى وضع المسار المكافئي المقطع للمقذوفات التي تكون سرعتها الأولية أفقية.

في السنوات التي كان فيها غاليليه يستخلص من تجاربه القوانين الأولى لحركة الأجسام الأرضية، كان كبلر يستنتج من الأرصاد المتراكمة على مر الزمن قوانين حركات الأجسام السماوية. وهكذا، فإن الميكانيك على سطح كوكبنا حيث تُستعمل الأجسام التي تسقط يومياً، وليس لديها الأسبقية على الميكانيك السماوي حيث التجربة

مستحيلة. وكان علما الميكانيك هذان، اللذان ظهرا متأخرين وفي آنٍ واحد، يبدوان مختلفين بشكل جذري. وقريباً ستذهب الصدفة إلى أبعد من ذلك: فهذان العلمان المتساويان في العمر سيندمجان ويتطابقان. وبعد مرور أقل من قرن على ولادتهما، سيقوم نيوتن بتوليفهما، وسيعود إلى الأسباب وسيبرهن أن قانوناً واحداً، بسيطاً جداً، يحكمهما. ومنذ ذلك الوقت سيقوم علم الميكانيك على جسم عقيدة متجانس وعالمي. ومن أجل ذلك، يجب كذلك أن يقوم نيوتن بإدخال مفهوم القوة النافذة أو القوة الجاذبة. ويقابل بعض المؤرخين ـ وخصوصاً الإنجليز ـ واقع أن هويغنز(*) (Huygens) (1629 ـ 1695) قد نشر قانون التسارع النافذ في مؤلّفه **الساعة الرقّاصة** (*Horologium oscillatorium*) عام 1673، بأن نيوتن إذا لم ينشر هذا القانون نفسه، بصيغة V^2/R، إلاّ عام 1687 (في كتاب **المبادئ**)، أي أربع عشرة سنة بعد هويغنز، فإنه بالمقابل كان يعرفها قبل هويغنز بعشر سنوات تقريباً، كما تثبته إحدى المخطوطات المؤرخة في العام 1664. ولكن، إذا كنّا نذكر المخطوطات، علينا إذاً أن نذكر مخطوطة هويغنز، **في القوة النافذة** (*De vi centrifuga*)، التي تتكلّم عن الموضوع نفسه والتي تتضمن النتيجة نفسها بتاريخ 1658. ولكن موضوع بحثنا لا يتعلق بفتح مجادلة بين هذين العالمين بعد موتهما لا سيما وأنهما يعالجان

(*) كريستيان هويغنز (Christian Huygens) (1629 ـ 1695): هو عالِم فلك ورياضي وفيزيائي هولندي. استطاع في العام 1655 بواسطة منظار صمّمه بنفسه أن يكتشف أوّل قمر لزحل، وهو تيتان (Titan) وأن يرصد حركة دوران زحل والمريخ وأن يعطي أوّل وصف دقيق لحلقات زحل. وقد اكتشف أنها مكوّنة من صخور. كما أنه رصد سديم الجبّار (Nébuleuse d'Orion) واستطاع الفصل بين مختلف النجوم التي تُكوِّن هذا السديم. ويُطلق اليوم على المنطقة الداخلية الأكثر سطوعاً من سديم الجبار اسم منطقة هويغنز (Région de Huygens) نسبةً إليه.

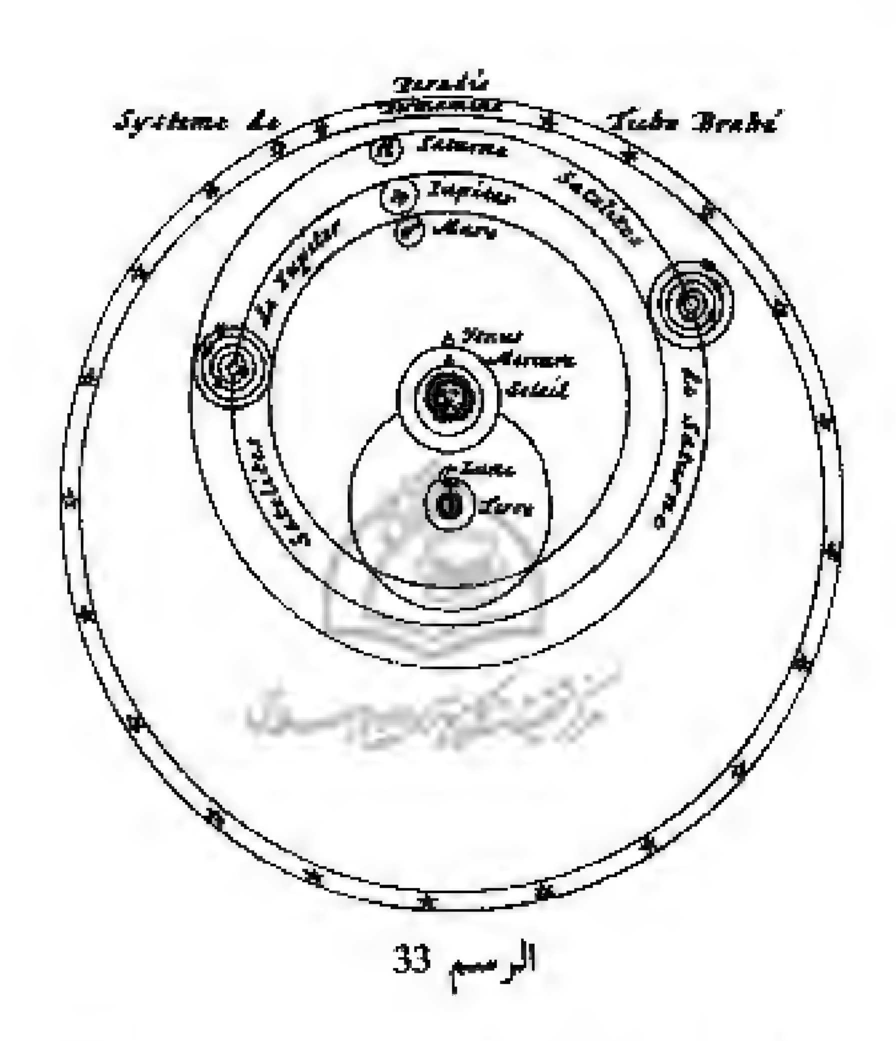
مسألة القوى التي تولّدها الحركة الدائرية بطريقتين مختلفتين لدرجة أن استقلالية أعمالهما واضحة جداً. فهويغنز ينطلق من المفهوم الديكارتي conatus de mouvement، أي من الميل إلى الحركة، في حين أن نيوتن ينطلق من مفهومي الفعل ورد الفعل الخاصين به. ولنحتفظ بالأساسي: منذ منتصف القرن السابع عشر، كنّا نعرف أن جسماً في حركة دائرية يخضع إلى تسارع يتناسب طردياً مع مربع سرعته وعكسياً مع شعاع مداره.

IV. تيكو براهي

في بداية القرن السابع عشر هذه، أي خمسون سنة بعد نشر في دوران لكوبرنيكوس، لم يكن انتصار مركزية الشمس قد تحقق. صحيح أن الحصن الأرسطي البطليمي يتزعزع، وصحيح أن تنظيم العالم البطليمي يتعارض معه اكتشاف أوجه الزهرة، وصحيح أن كل يوم يشهد اكتشاف أن السماوات ليست ثابتة، ولكن نظاماً هجيناً، وهو نظام تيكو براهي (1546 ـ 1601)، سيجذب لفترة جزءاً من العالم العلمي وعلماء اللاهوت. يقدّم تيكو براهي نظامه عام 1588 في مؤلّفه (*De mundi aetheri recentioribus phaenomenis*) المخصص لأرصاد مذنّبات الأعوام 1577 و1580 و1582 و1585، وهي مذنبات كان قد حدّد اختلاف منظرها، مبيّناً بذلك أن هذه الأجسام التي تظهر في تواريخ غير متوقّعة بتاتاً ليست ظواهر جوية بل تنتمي بالفعل إلى العالم السماوي. إن هذا النظام (انظر الرسم 33) الذي ترافق فيه الكواكبُ الشمس في مسيرتها حول الأرض بعد أن أضحت ثابتة في مركز العالم يطمح إلى الجمع بين ميزات النظام البطليمي بثبات الأرض وميزات النظام الكوبرنيكي، إذ إنه يشرح كل المظاهر الحركية للحركات السماوية. ولكنه نظام لا يقدّم تناسق نظام

كوبرنيكوس وهو لا يخضع للرابط البسيط الموجود بين المسافات ومدد دوران الكواكب التي توصّل كبلر إلى التعبير عنها رياضياً منذ فترة وجيزة. وهو نظام لسنا أكيدين أن تيكو هو الذي اخترعه، ويصفه كبلر باللانظام لأن هذا الغياب للرابط يفتح المجال أمام كل التغيرات الممكنة. وبالفعل، سيرى عدد كبير من الأنظمة المختلطة النور في نهاية القرن السادس عشر وبداية القرن السابع عشر. غير أن تيكو براهي يبقى مشهوراً لنوعية أرصاده، مع أنه يقوم بأرصاده بالعين المجرّدة، ولكن العناية التي بذلها في صناعة أدواته وفي شروط استعمالها ستمكّنه من أن يربح دقة بعامل خمسة عشر: وفي حين لم يحدد علماء الفلك، من هيبارخوس إلى كوبرنيكوس، موقع الأجرام السماوية إلاّ بدقة نصف درجة تقريباً، أدخل تيكو دقة في الأرصاد بنحو دقيقتين قوسيتين. بيد أن إحدى الحجج التي سيستند عليها تيكو لرفض مركزية الشمس الكوبرنيكية ستكون بالضبط ذات طابع رصدي. لقد خُدع تيكو براهي بانتشار الصور النجمية على شبكية أعيننا فأعطى النجوم أقطاراً ظاهرة: مئة وعشرين ثانية (أي دقيقتين قوسيتين) للنجوم من القدر الأول؛ تسعين ثانية للنجوم من القدر الثاني، ... إلخ. دقيقتان قوسيتان هي بالتحديد الدقة المتوسطة لأرصاد الموقع عنده. غير أن تيكو لم يسجّل، بعد مرور ستة أشهر، وفي حين كان يجب على الأرض أن تكون في نقطتين متقابلتين قطرياً من مدارها الكوبرنيكي، أيّ اختلاف بالمنظر، أي إنه لم يسجّل أي تغيير نظري لموقع النجوم. ولكن، كلما كان الجرم السماوي أبعد كان اختلاف منظره أصغر، وبالنسبة إلى قطر ظاهر معيّن، كلّما كان الجرم أبعد كان قطره الحقيقي أكبر. والنتيجة واضحة: إذا كان القطر الظاهر لمدار الأرض، عند رؤيته من النجوم أصغر من القطر الظاهر لهذه النجوم، فهذا لأن القطر الحقيقي للنجوم أكبر من القطر الحقيقي

لمدار الأرض. يرفض تيكو براهي عالماً يكون فيه حجم الأجسام أكبر من المسافات التي تفصل بينها. ولنذكر أخيراً أن تيكو إذا كان قد رفض مركزية الشمس، فإنه قد شارك في إظهار شوائب فيزياء أرسطو.



الرسم 33

وفي ليلة 11 تشرين الثاني/ نوفمبر عام 1572، لاحظ تيكو براهي نجماً أكثر لمعاناً من الزهرة في شمال غربي كوكبة ذات الكرسي، في موقع لم يكن فيه أي جرم في الليلة الفائتة. فقد استعمل تيكو، لقياس المسافات الزاوية من النجم الجديد إلى النجوم المجاورة، سدسية كانت أذرعتها التي يبلغ طولها قرابة 1,70م مصنوعة من خشب الجوز المعتق. وهذه المادة أخف من المعادن كالنحاس الأصفر أو البرونز، وهي إحدى الأنواع الأقل تأثراً

بالتغيرات المناخية. غير أن عضادات التصويب التي كانت تجهّز الأذرعة، والوصلة التي تجمعها، كانت معدنية. وكان قوس الدائرة قد قُسّم إلى درجات، وكانت هذه الدرجات قد قُسّمت حسب تقنية المقياس المائل (انظر الرسم 34)، وهذه حيلة تُمكّن من زيادة دقّة القراءة كان ليفي بن جرسون (Levi ben Gerson) قد اخترعها في القرن الرابع عشر.



الرسم 34

وضع تيكو سدسيته في المستوي الزوالي لفتحة نافذة. كان طرف الذراع الثابتة القريبة من القوس المقسّم إلى درجات مسنوداً على دعامة النافذة، في حين كان الطرف القريب من الوصلة مسنوداً على ركيزة داخل الغرفة. وليتأكّد من ماهية أحوال الرصد، كان تيكو يركّز الآلة بين العبور السفلي للجرم السماوي وعبوره العلوي. وليتأكّد أن الذراع الثابتة كانت أفقية تماماً، كان يحرّكها حتى يصل خيط من رصاص معلّق بالقوس المقسّم قبالة علامة محفورة على الذراع. وهكذا، قاس تيكو المسافات من النجم الجديد إلى تسعة نجوم مجاورة. وبصبر، قام برصد النجم الجديد كلّ ليلة كان يسمح فيها صفاء السماء بالرصد، وذلك طوال الثمانية عشر شهراً التي كان النجم يسطع خلالها. وعندما لم يلاحظ، طوال الثمانية عشر شهراً،

أي تغيّر بالمسافات بين النجم الجديد والنجوم الثابتة التي ظهر وسطها، اضطر إلى التسليم بأن هذا الجرم هو نجم؛ وخرج مبدأ ثبات السماوات في ما وراء المدار القمري الأرسطي من هذه النتيجة ضعيفاً، وتيكو براهي بغرابة متعاظماً. غير أن كون تيكو براهي قد اعتبر النجم الجديد معجزة يضعف خلاصته: إذا كان النجم الجديد معجزة، فإنه لا يشكك بثبات السماوات أكثر مما يشكك بعث لازار (Lazard) بالميتة البشرية. ولكن ظهور مذنب بعد خمس سنوات سيعطي تيكو فرصة لتجديد مأثرته الرصدية والعابثة بالتقاليد، فهو سيبرهن هذه المرة أن هذا المذنب ليس ظاهرة تحدث تحت القمر وإنما مسافتها إلى الأرض يجب أن تساوي على الأقل ست مرات مسافة القمر إلى الأرض. وظهرت مذنبات أخرى في الأعوام 1580 و1582 و1585 و1590، أكّدت على خلاصة العام 1577 وهي أن الرصد الدقيق لهذه الظواهر كان ينفي الاعتقاد بأن الكون لا يتغير وبأن الكرات المادية التي يُفترض بها أن تحمل الكواكب وتحركها لا وجود لها، إذ كان تيكو قد برهن إضافة إلى ذلك أن مسارات المذنبات تعبر من دون عائق مداري عطارد والزهرة. وإن الأجرام السماوية لا تحركها كرات حاملة، بل إنها تتحرك بنفسها. ويُضاف إلى السؤال التقليدي، كيف تتحرك الأجرام السماوية، سؤال جديد، لماذا تتحرك الأجرام السماوية؟ وعلينا انتظار نيوتن ليتم الإجابة عن هذا السؤال.

الفصل الخامس
ولادة علم الفلك الكلاسيكي

I. سقوط تفاحة

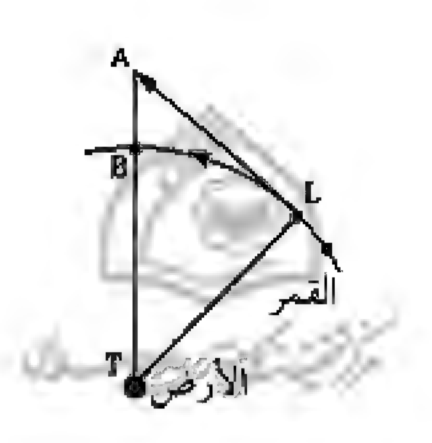
ولد إسحق نيوتن (Isaac Newton) في 4 كانون الثاني/ يناير عام 1643 في قرية وولزثورب (Woolsthorpe) الصغيرة، وكان والده قد توفي قبل ثلاثة أشهر من ولادته. كان نيوتن طفلاً خديجاً وكانت أيامه الأولى صعبة. وعندما لم يكن يبلغ سوى سنتين من العمر، تزوجت والدته ثانيةً من قسّيس، ورحلت في الحال مع زوجها الجديد تاركةً إسحق في رعاية جدته وعمه. ارتاد نيوتن مدرسة غرانثام (Grantham) الابتدائية ثم الثانوية، حتى بلوغه سن السادسة عشرة، من دون أن يترك أي ذكرى تدل على عبقرية مبكرة. ورجعت والدته إلى البلد، وهي أرمل للمرة الثانية، واصطحبت إسحق معها آملةً أن يدير المزرعة التي ورثتها عن زوجها الثاني. لقد كان نيوتن على وشك أن يصبح مزارعاً. لكنه، ولحسن الحظ، طلب أن يعاود دراسته، فوافقت العائلة. وصل نيوتن إلى كامبردج (Cambridge) عام 1660، وتعرّف هناك على شخص سيؤثر كثيراً في حياته هو إسحق بارو (Isaac Barrow)، عالم رياضيات قدير سيلفت مؤلّفه **دروس في الرياضيات** (*Leçons mathématiques*) انتباه لايبنتز

(Leibniz) ولوبيتال (L'Hôpital). ونعلم أن نيوتن، بالإضافة إلى هذا الكتاب، قد قرأ ودرس وانتقد في بعض الأحيان وهو يدوّن ملاحظات كتاب **الأصول** لإقليدس و**الهندسة** (*Géométrie*) لديكارت (Descartes) و**حساب اللانهائيات** (*Arithmetica infinitorum*) لواليس (Wallis)، بالإضافة إلى **الحوار** (*Dialogo*) لغاليليه ومؤلفات فيات (Viète). وهكذا، فإن نيوتن كان قد حاز على شهادة البكالوريا واكتسب تكويناً جيداً رياضياً عندما ترك كامبريدج التي اجتاحها الطاعون، ليلجأ إلى مسقط رأسه.

وشكّلت مرحلة العزلة الاضطرارية هذه مرحلة تفكير عميق: فخلالها سيضع نيوتن الأسس الأولى لعلم بصرياته ولتطبيق التسلسلات اللامتناهية في منهجية عامة لتحليل الخاصيات المتناهية للمنحنيات وللمساحات التي تولّدها، ولعلم الميكانيك. وتقع حادثة التفاحة في هذه الفترة الزمنية. ورغم أن هذه الحكاية قد رواها نيوتن بنفسه، إلاّ أنها اعتُبرت أسطورية في أغلب الأحيان، ويفضل عدد من المربّين عدم ذكرها. ولكن هذه الحكاية مثالية، أأسطورية كانت أم حقيقية، ليس لأنه يجب أن نستخلص منها أنه يكفي أن نحلم تحت ضوء القمر تحت شجرة تفاح(*) لكي نكتشف قانوناً أساسياً كقانون الجاذبية الكونية، بل لأنها تكشف لنا عن النواة الأساسية والمدهشة ببساطتها لهذا الاكتشاف. أي أن يطرح المرء على نفسه سؤالاً بمثل هذه البساطة، ولكنه سؤال لم يُطرح قط قبل نيوتن

(*) كان نيوتن يدرس منذ فترة نظرية كبلر حول القوانين التي تخضع لها حركات الكواكب. وتروي الحكاية أنه كان يجلس في يوم من الأيام تحت شجرة تفاح وهو مستسلم لأفكاره، إذ بتفاحة تقع عند قدميه، وهذه الحادثة دفعته إلى التفكير بالقوة التي تجعل الأجسام تقع نحو مركز الأرض بسرعة متزايدة وبالنتيجة عن إمكانية امتداد قوة الجذب هذه إلى القمر.

وهو: «لماذا لا يقع القمر على الأرض كما تقع هذه التفاحة؟»، وأن يستشفَ هذا الجواب المفارِق والرائع وهو: «إن القمر يقع نحو الأرض». إن القمر يقع في كل لحظة، وإذا لم يكن يقع بموجب مبدأ العطالة، فإنه سيبتعد عن الأرض بخط مستقيم وفق المُماس LB لمداره (انظر الرسم 35): وفي الوقت الذي يستغرقه القمر ليقطع الجزء الصغير LA من مداره، يقع نحو الأرض مسافة BA. وهكذا، فإن مدار القمر ليس سوى الحل الوسط بين هذا السقوط الدائم والميل إلى الهروب في خط مستقيم في الفضاء.



الرسم 35

أن يهبط عليه هذا الإلهام شيء، وأن يعبّر عنه ويستخلص منه المبادئ (*Principia*) لشيء آخر سيتطلب منه عشرين سنة. ولكنه من الواضح أن نيوتن يطرح في الحال السؤال الأساسي: هل إن سقوط الأجسام، كما أعطانا غاليليه قوانينه، ودوران القمر حول الأرض، وفقاً للقواعد التجريبية لكبلر، هل إن كل ذلك يخضع للقانون الفيزيائي نفسه؟

ولقد كان نيوتن مقتنعاً بأن الأمر كذلك، فافترض بأن القمر ـ لكونه أبعد ستين مرة عن مركز الأرض من التفاحة ـ يجب أن يكون

تسارع سقوطه الحرّ أقل 3600 مرة من تسارع التفاحة، وذلك وفقاً لقانون التربيع العكسي. وبما أنه من الواضح أن القمر لا يقع، كان لا بد من افتراض أن تسارعه النابذ يعوّض عن تسارع الجاذبية. ويجب أن يتم الجواب عن هذا السؤال عبر الحساب الفعلي للقوة النابذة في حال النظام الأرضي القمري. وفي تلك الفترة، أي في العام 1667 أو العام 1668، ولم يستطع نيوتن أن يجزم. وغالباً ما قيل، وبحق، أن هذا العجز المؤقت يعود إلى عدم دقة معطية واحدة من المعطيات العددية، وهي: قياس شعاع الأرض. غير أن الكاهن جان بيكار (Jean Picard) سيعطي منذ العام 1671 القياس الصحيح لهذا الشعاع(*)، وستُعرض أعماله في العام التالي، عام 1672، وتُناقش أمام الجمعية الملكية(**). بيد أنه يجب انتظار حلول العام 1684 لكي يستأنف نيوتن أعماله عن الجاذبية، إذ إنه بالإضافة إلى المشكلة المذكورة آنفاً كانت تُضاف مشكلة أخرى معيقة لم يكن نيوتن يستطيع حلّها في ذلك الوقت وهي أن يثبت أنه يمكن اعتبار القمر والأرض نظرياً كنقطتين يُنسب إلى كلٍّ منهما كتلته الخاصة. ومهما يكن الأمر فإن نيوتن لم يجزم في العام 1668 في ذلك الأمر واحتفظ بحرص شديد بأفكاره الأولى حول الجاذبية.

(*) أراد بيكار تحديد قيمة شعاع الأرض، فقام بقياس درجة من خط العرض عبر تقسيم خط زوال باريس إلى مثلثات. وتوصّل إلى تحديد قيمة درجة من خط العرض من 111 كلم إلى 112 كلم، وبالنتيجة حدّد قيمة قطر الأرض بـ 6372 كلم (مقابل القيمة المحددة حالياً بـ 6375 كلم).

(**) تمّ تأسيس الجمعية الملكية المعروفة أيضاً باسم جمعية لندن الملكية لتحسين المعرفة الطبيعية (Royal Society of London for the Improvement of Natural Knowledge) عام 1660 في عهد الملك شارل الثاني. وهي مؤسسة تابعة للمملكة المتحدة، تعمل على نشر العلم وتشجيع الأبحاث العلمية.

II. المبادئ

سيكشف نيوتن عن نتائجه عام 1687 بالشكل الذي يعتبره الأكثر أناقة والأكثر اقتصاداً، وسيعفينا من مقارباته التمهيدية. يتألف كتاب **المبادئ الرياضية للفلسفة الطبيعية** (*Philosophiae naturalis principia mathematica*) من ثلاثة أجزاء يسبقها مقطعان صغيران. يُقدم المقطع الأول سلسلة من ثمانية تعريفات هي: 1 - تُقاس كمية المادة بالثقل النوعي والحجم معاً، 2- إن كمية الحركة هي حاصل ضرب الكتلة بالسرعة، 3- إن القوة الداخلية للمادة هي قدرتها على المقاومة، وهي القوة التي تمكّن كل جسم من البقاء بنفسه ساكناً أو متحركاً بسرعة ثابتة وعلى خط مستقيم، 4- إن القوة المنقولة هي الحركة التي يتغير تحت تأثيرها حال الجسم، سواء كانت هذه الحالة هي السكون أو الحركة الثابتة على خط مستقيم، 5- إن القوة الجاذبة هي القوة التي تشد الأجسام نحو نقطة معينة، كما يُجذَب نحو المركز مثلاً، 6- إن الكمية المطلقة للقوة الجاذبة يختلف كبرها، وذلك حسب فعالية المصدر الذي ينشرها انطلاقاً من المركز، 7- إن المقدار المسرّع للقوة الجاذبة متناسب مع السرعة التي يولدها خلال فترة معينة، 8- إن المقدار المحرك للقوة المسرّعة متناسب مع الحركة التي يولدها خلال فترة معينة.

إن التعريف الأول ليس تعريفاً سوى في الظاهر. فمفهوم الكتلة لا يمكن إيضاحه بتعريفه كحاصل ضرب الحجم بالثقل النوعي إذ إن الثقل النوعي ليس سوى كتلة وحدة الحجم. والتعريف الثاني ليس سوى صياغة عملية حسابية بالكلمات. والتعريف الثالث هو النتيجة المنطقية لما قيل عن القوى المسرعة في التعريفات الرابعة إلى الثامنة. أما التعريف الرابع فإنه يعبّر عن أساس الفيزياء الجديدة: إن تسارع حركة جسم هو إشارة إلى أن هذا الجسم قد تأثر بقوة خارجية،

وهذا التسارع هو مقياس هذه القوة. ثم إن عرض مفهوم القوة في تعريف أو أكثر ليس سوى مسألة شكليات.

وتلي هذه التعريفات ملاحظة يحدد فيها نيوتن أنه كان يريد أن يفسر المعنى الذي يعطيه للمصطلحات الشائعة الاستعمال، ويضيف فيها التعريفات المتعلقة بالزمن والمسافة والمكان والحركة، وإن كانت معروفة من الجميع، وذلك لكي لا يتم الخلط بين المطلق والنسبي، وبين الحقيقي والظاهري، وبين الرياضي والشائع.

ثم يأتي المقطع الثاني حيث يعرض نيوتن مبادئ أو قوانين الحركة: وهي ثلاثة. الجسم الساكن يبقى ساكناً والمتحرك يستمر في حركته بسرعة ثابتة وعلى خط مستقيم ما لم تؤثر عليه قوة خارجية. إن تغيير الحركة يتناسب مع القوة المحركة الحاصلة، ويتم في اتجاه الخط المستقيم الذي تقع فيه تلك القوة. إن كل فعل يقابله رد فعل يساويه بالمقدار ويعاكسه في الاتجاه، أي إن أفعال جسمين على بعضهما بعضاً تتساوى دائماً بالمقدار وتتم باتجاهات معاكسة.

بما أننا أتينا على ذكر الفعل وردّ الفعل، وتكلمنا من جديد عن تسارع الأجسام في الحركة الدائرية التي نسبنا أولويتها إلى هويغنز، فقد بات من الضروري أن ننصف نيوتن لنوعية مقاربته، وأن نذكر أن هويغنز إذا كان قد استنبط من هذا التسارع الذي سماه «قوة نابذة» ضغطاً يمارسه الجسم المتحرك على جانبية مساره، فإن نيوتن، من جهته، قد تكلم عن قوة جاذبة واستنبط منها ما كان يعتبره سبب هذا المسار. وهاتان وجهتا نظر متعاكستان ولكن كلتيهما صالحتان على حد سواء إذ إنهما تتوافقان مع مفهوم الفعل ورد الفعل. ولكن وجهة نظر نيوتن تحمل التطور المستقبلي لعلم الميكانيك السماوي. زد على ذلك أن هويغنز لم تخطر بباله فكرة الجاذبية التي تمتدّ من الأجسام الأرضية وحتى الأجسام السماوية الأكثر بعداً، كما يعترف

هو نفسه بذلك في كتابه حوار يتعلق بسبب الجاذبية *(Discours de la cause de la pesanteur)* الذي يلي مؤلّفه بحث في الضوء *(Traité de la lumière)*: «ليس لدي إذاً أي شيء ضدّ القوة الجاذبة، كما يسميها السيد نيوتن، التي تجعل الكواكب تنجذب نحو الشمس، والقمر ينجذب نحو الأرض. [...]. ولا مانع أن يكون سبب هذه القوة الجاذبة نحو الشمس مشابهاً للسبب الذي يجعل الأجسام المدعوة بالوازنة تقع باتجاه الأرض. ولقد كنت أتخيل منذ زمن طويل أن السبب الذي يجعل شكل الشمس كروياً يمكن أن يكون السبب نفسه الذي ظننته يجعل الأرض كروية. ولكنني لم أكن قط قد وسعت تأثير جاذبية الأرض إلى مسافات ضخمة كمسافة الشمس إلى الكواكب ومسافة الأرض إلى القمر، وذلك لأنها كانت تتعارض مع دوّامات السيد ديكارت التي كانت تبدو لي مقبولة في ما مضى والتي كانت ما زالت في ذهني. ولم أكن قد فكرت كذلك بهذا الانخفاض المنتظم في جاذبية الأرض، ولم أكن أعرف أنه يتناسب عكسياً مع مربع المسافات إلى المركز».

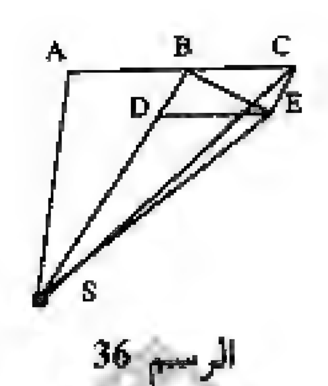
خُصّص الكتاب الأول من المبادئ لدراسة حركات الأجسام الخاضعة لتأثير قوة مركزية في الحالة المثالية التي تكون فيها هذه الأجسام في فراغ مطلق. ويدرس الكتاب الثاني حركات الأجسام نفسها عندما تكون مغمورة في سائل مقاوم نوعاً ما. أما الكتاب الثالث فإنه يعرض نظام العالم. ويفتتحه نيوتن بقوله: «لقد أعطيت في الكتب السابقة مبادئ الفلسفة الطبيعية، ولقد عالجتها كعالم رياضيات أكثر من عالم فيزياء، إذ يمكن للحقائق الرياضية أن تكون أساساً للعديد من الأبحاث الفلسفية، كالأبحاث عن قوانين الحركات والقوى المحركة. ولكي أجعل هذه المواد أكثر فائدة، أضفت إليها بعض الملاحظات التي عالجت فيها الثقل النوعي للأجسام

وصلابتها، والفراغ، وحركة الصوت وحركة الضوء، وهي في الحقيقة أبحاث أكثر فيزيائية. ولم يبقَ لي سوى شرح النظام العام للعالم وفق المبادئ الرياضية نفسها». وفي الواقع، سيكون الكتاب الثالث بالكاد أقل اهتماماً بالرياضيات من الكتابين السابقين، رغم أن نيوتن قد تردد، فهو لم يختر أن يحصر جمهوره إلاّ خوفاً من أن يفتح مجالاً لمجادلات أولئك الذين قد لا يريدون أن يتركوا أحكامهم المسبقة القديمة.

إن الكتاب الأول وحده، أو نوعاً ما الجزء الأول منه المخصص لحساب القوة المركزية لحركة دائرية، يتضمن بشكل أولي كل ما يمكننا استخلاصه من الجاذبية الكونية، شرط أن نتبع مراحل تكوّن هذا الكتاب في مخطوطات نيوتن، كما فعل غاندت (F. de Gandt). إن القضية الأولية للكتاب الأول هي تعميم لقانون المساحات، وهو قانون كبلر الثاني: «إن الأجسام المتحركة في حركات منحنية الأضلاع ترسم حول مركز ثابت مساحات موجودة في مسطح واحد ثابت ومتناسبة مع الوقت». ثم تأتي القضية العكسية لهذه القضية، وهي القضية الثانية: «إن القوة الجاذبة لجسم يتحرك على خط منحنٍ رُسم على مسطّح ويقطع مساحات متناسبة مع الوقت حول نقطة ثابتة، هي موجّهة بالضرورة نحو هذه النقطة».

يُفسّر قانون المساحات ببساطة شديدة بالفعل إذا افترضنا أن الكوكب يخضع لتسارعٍ موجّه بشكل دائم نحو الشمس. لنفترض أن الوقت مقسم إلى فترات صغيرة متساوية. وليكن SAB القطاع الذي يقطعه المتجه النصف القطري في وحدة من الوقت (انظر الرسم 36). إذا كان التسارع معدوماً، سيقطع هذا المتجه، في وحدة الوقت التالية، القطاع SBC، حيث BC تساوي AB وتقع في امتدادها. ولكن إذا أحدث تسارعٌ مركزي، في وحدة الوقت الأولى، سرعةً ما

تجعل الكوكب يقطع المسار BD في المدة عينها، فإن القطاع الأساسي الثاني الذي يقطعه الشعاع لم يعد SBC وإنما SBE، حيث BE هي خط الزاوية في متوازي الأضلع المبني على BC وBD. ويمكن بالنتيجة لنيوتن أن يؤكّد، بناء على منهج التفاضل الذي استند فيه إلى منهج العلل الأولى والقصوى، أن SBE = SBC = SBA.



الرسم 36

إن قانون المساحات إذاً هو نتيجة مباشرة لفرضية التسارع المركزي التي حُملنا بالنتيجة على قبولها. وبناء على ذلك يعطي قانون كبلر الثالث شكل قانون المساحات. وتعبّر عنه العلاقة التالية:

$$R^3/T^2 = K = \text{constante}$$

بما أن مدارات الكواكب إهليلج لا يختلف كثيراً عن الدوائر، يمكننا أن نسلّم، للسهولة، أنها دائرية. ويبيّن نيوتن عندها أن التسارع الجاذب في الحركة الدائرية يمكن إعطاؤه بالمعادلة التالية:

$$A = K_1 V^2/R$$

والواقع أن نيوتن يُقدّم هذه العلاقة في **المبادئ** انطلاقاً من مربع الأقواس التي يتم اجتيازها في سرعة ثابتة، وهذا ما يؤدي إلى النتيجة نفسها. ولكن إذا أشرنا بـ T إلى الدور، يكون لدينا:

$$V^2 = K_2 R^2/T^2$$

ومن هذا، إذا أدخلنا قيمة V^2 هذه في المعادلة السابقة، فإننا نحصل على ما يلي:

$$A = K_3 R/T^2$$

ويمكن أن تُكتب هذه المعادلة في الصياغة التالية:

$$A = K_3/R^2 \times R^3/T^2$$

ومن هنا، ولما كانت R^3/T^2 ثابتة وضعناها بالرمز K، فإننا نحصل على ما يلي:

$$A = K_3/R^2 \times K = K_4/R^2$$

وبمجرد أن نصل بذلك إلى فرضية التسارع المركزي المتناسب عكسياً مع مربع المسافة، تصبح المقابلة ـ أي برهان أن هذا التسارع يولّد حركة يكون مسارها مخروطي الشكل واهليلجياً بوجه خاص ـ مسألة رياضية بحتة.

وإذا كان التتابع بسيطاً ودقيقاً، وإذا كان يأخذ بعين الاعتبار قانوني كبلر الأخيرين، فإن فحص المخطوطات التحضيرية للمبادئ تدل أن نيوتن كان قد برهن هذه النتيجة للحركة الدائرية المنتظمة من دون أن يُدخل قانون المساحات. فقد كان قد عبّر عن قانون التسارع الجاذبي كالآتي: «إن القوى الجاذبة لأجسام تتحرك بسرعة ثابتة على محيطات دوائر تساوي مربعات الأقواس التي ترسمها في المدة نفسها.»

وبالفعل، لنأخذ دائرتين C_1 وC_2، وجسمين M_1 وM_2 يقطعان قوسين M_1A_1 و M_2A_2 (انظر الرسم 37). إذا لم يكن هذان

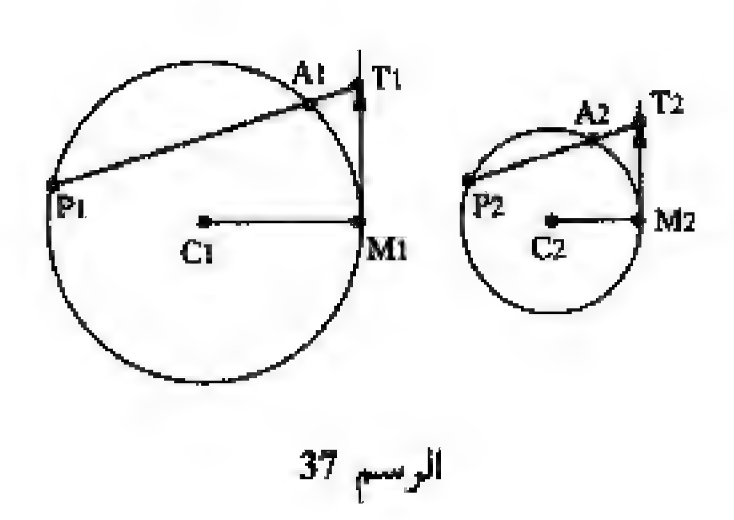
الجسمان يخضعان لأي قوة، فإنهما يقطعان القطعتين A_1T_1 و A_2T_2. ولكن القوى الجاذبة التي يخضعان إليها تجذبهما نحو C_1 وC_2 وحتى M_1 وM_2. وهذه القوى هي بين بعضها كما هي المسافات T_1A_1 وT_2A_2 بين بعضها، أي أنه، إذا استعملنا القدرة في نقطة ما بالنسبة لدائرة، فإنها تكون بين بعضها البعض مثل:

$(M_1T_1)^2/T_1P_1$ بالنسبة إلى $(M_2T_2)^2/T_2P_2$

أو مثل

$(M_1A_1)^2/1/2TP_1$ بالنسبة إلى $(M_2A_2)^2/1/2T_2\,P_2$.

غير أنه يمكننا أن نستبدل $1/2T_1P_1$ و$1/2T_2\,P_2$ بشعاعي الدائرتين، C_1M_1 وC_2M_2، وذلك لأن M_1A_1 وM_2A_2 صغيران جداً ويمكننا أن نصغرهما بقدر ما نريد. وبالنتيجة يمكننا أن نضع القضية انطلاقاً من الانحراف عن مبدأ العطالة ومن نظرية النسبيات المطبقة على قطع صغيرة بقدر ما نريد.



الرسم 37

يصف نيوتن في الكتاب الثالث من **المبادئ** حركات الكواكب وحركات أقمارها ويبرهن قوانين هذه الحركات انطلاقاً من مبدأ الجاذبية الكونية. وعلى وجه الخصوص، تجد قوانين كبلر الثلاثة التجريبية، في هذا الكتاب، تفسيرها الرياضي. وبمصطلحات عصرية، إذا كان للشمس S كتلة M، ولكوكب P كتلة m، فإن معادلة حركة الكوكب، في نظام شمسي المركز ذي محاور ثابتة بالنسبة إلى النجوم، تكون كالآتي:

$$d^2 SP/dt^2 = - K(M + m) SP/SP^3.$$

إن تطبيق مقولة العزم الحركيّ على هذه الحركة يُظهر إذاً أن المتجه SP يغطي مساحات في مستويات واحدة تتناسب مع الوقت. وتُظهر دراسة المسار أنه دائماً مخروطي الشكل تكون بؤرته في S ويختلف نوعه وفقاً للظروف الأوّلية لحركة الكوكب. وتكون هذه المخروطيات إهليلجات في حالة كواكب النظام الشمسي. وأخيراً نُظهر كذلك أنه إذا أشرنا بـ T إلى مدة الدوران وبـ a إلى قيمة نصف المحور الكبير للإهليلج، يصبح لدينا:

$$a^3/T^2 = K' (M + m)$$

حيث K' هي ثابتة الجاذبية الكونية مقسومة على 4π. ونرى هنا أن هنالك ابتعاداً بسيطاً بالنسبة إلى قانون كبلر الثالث الذي يؤكد ثبات الطرف الأول مهما كان الكوكب المأخوذ بعين الاعتبار. ويجب أن نُسلّم، لإزالة هذا الابتعاد، أن كتلات الكواكب كلها متساوية بالنسبة إلى كتلة الشمس. ويمكننا أن نضيف أيضاً أنها قليلة الأهمية. وتمكننا هذه العلاقة من استنتاج نِسب كتل الكواكب إلى كتلة الأرض، وكتلة الشمس وكتل الكواكب التي لديها أقمار.

ويُبيّن نيوتن في الكتاب الثالث كذلك أن المذنبات تنتمي إلى

النظام الشمسي وأنها ترسم إما إهليلجات ممتدة أكثر بكثير من تلك التي ترسمها الكواكب، أو قطوع مكافئة. وفي الحال الأولى، ستسمح معرفة جزء من الإهليلج الذي يقطعه المذنب من معرفة مساره الكامل ومن توقُّع تاريخ عودته.

III. طرق جديدة

كتب نيوتن عام 1672: «لكي أفي بوعدي الجديد، سأعلمكم، من دون أي تكلّف، أنني اقتنيت في بداية العام 1666 موشوراً زجاجياً ثلاثياً لكي أقوم بتجربة ظاهرة الألوان الشهيرة. وجعلت غرفتي مظلمة من أجل هذه الغاية، وتركت ثقباً صغيراً في نافذتي لكي تدخل منه كمية كافية من ضوء الشمس، ثم وضعت الموشور عند مدخل الضوء بطريقة تمكّنه من الانكسار على الحائط المقابل. وسرّني في بداية الأمر رؤية الألوان الزاهية والغامقة التي نتجت عن ذلك». وقام نيوتن، بعد انقضاء لحظة الانفعال الجمالي الأولى، بعدد من التجارب على تفكك الضوء الأبيض هذا إلى مجموعة من الأضواء الملوّنة التي تشكل أساس ما نسميه بعلم الطيف.

ونَدين كذلك لنيوتن بصنع أول تلسكوب، هذه الأداة ذات المرايا التي ستحلّ محل المنظار ذي العدسات والتي ستصبح الأداة المفضّلة لدى علماء الفلك الفيزيائي. ويكتب نيوتن في القضية الثالثة من الجزء الثاني من الكتاب الأول من مؤلفه **البصريات** (*Optique*): «لقد وجدت، بالإضافة إلى ذلك، أن الضوء عندما يمر من الهواء عبر أوساط متجاورة كاسرة مختلفة، كالماء والزجاج، ثم يعود منها إلى الهواء، سواء أكانت المستويات الكاسرة متوازية أو مائلة على بعضها البعض، وجدت أن هناك انكسارات معاكسة تصوّب الضوء في كل مرة بحيث إنه يخرج في خطوط متوازية للخطوط التي وقع

الضوء وفقاً لها. وهو يظل دائماً أبيض. ولكن، إذا كانت الأشعة مائلة أو ساقطة، فإن بياض الضوء المنبعث يصبح ملوّناً تدريجياً في أطرافه، كلما ابتعد عن مكان انبعاثه». لقد اكتشف نيوتن بذلك الزيغ اللوني: إن الأضواء الملوّنة المختلفة التي يتألّف منها الضوء الأبيض لا تنحرف بالطريقة نفسها عبر عدسة المنظار، وبالنتيجة فإن الصورة الزرقاء لا تتكون على المستوي نفسه الذي تتكون عليه الصورة الحمراء. واستنتج نيوتن من ذلك أن تحسين المنظار لم يكن الطريق الصحيح. وقد كان مقتنعاً بأنه من المستحيل إزالة الزيغ اللونيّ من العدسات. وبما أنه لم يكن لانعكاس الضوء سيئة انكساره، فقد عزم نيوتن على صنع تلسكوب ذي مرايا: وقدّم تلسكوبه الأول إلى الجمعية الملكية عام 1671. بيد أنه علينا أن نُذكّر أن غاليليه كان أول من عرض فكرة استعمال مرايا عوضاً عن العدسات. كان «ساغريدو» (Sagredo)، صديق غاليليه، قد صمّم مشروع تلسكوب ذي مرايا، ونجد في المراسلات بين غاليليه وقيصر مارسيلي (Cesare Marsili) (1592 ـ 1633) إشارة إلى تلسكوب صُنع من قبل شخص يدعى قيصر كارافادجي (Cesare Caravaggi)، من بولونيا: «الذي، بالانعكاس، يمكن أن يكون له، بل يكون له فعلاً وقع المنظار».

الفصل السادس
علم الفلك الكلاسيكي

I. الروّاد

إذا كان نيوتن هو أحد مؤسسي حساب التفاضل والتكامل، فإنه يجب أن نذكّر أن الطريقة التي يعرضها في **المبادئ** هي طريقة علماء الهندسة القدامى: وهي ترتكز على استخلاص النتائج من فرضيات محددة، وتحمل اسم الطريقة التركيبية. وعلى العكس من ذلك، إذا كنا نبحث عن شروط وضع نظرية أو خصائص شكلٍ ما، فإننا نتّبع الطريقة التحليلية. غير أن علم الميكانيك السماوي لن يكشف عن كل قدرته التفسيرية والتكهنية إلا مع تطوّر التحليل الرياضي: ما تسمّيه اليوم علم الميكانيك التحليلي، بالمقابلة مع علم الميكانيك التركيبي لنيوتن، ليس سوى معالجة علم الميكانيك بالحساب. وعلم الميكانيك السماوي هو تطبيق قوانين علم الميكانيك التحليلي في دراسة حركات الأجرام السماوية التي تخضع لقوى جاذبة. وبالنتيجة، فإن مبادىء علم الميكانيك السماوي هي مبادىء علم الميكانيك العامة التي يجب أن نضيف إليها قانون الجاذبية الكونية. وإن كون المسيرة قد توبعت على القارة التي كان التحفّظ حول مفهوم الجاذبية فيها الأكثر شدّة، وبالأخص في فرنسا (كان الديكارتيون يرون في

هذا المفهوم عودة إلى الصفات الباطنية للفيزياء القديمة)، هو أقل مفارقة مما يبدو عليه فديكارت هو أول من عالج المسائل الهندسية بواسطة الجبر.

1. ليونارد أويلر

لقد وضع أويلر (Léonard Euler) (1707 ـ 1783) أسس علم الميكانيك التحليلي في مؤلّفه (*Mechanica, sive motus scientia analytice exposita*) الذي نُشر عام 1736، ولكن طريقته كانت لا تزال مثقلة بأساليب الطريقة التركيبية القديمة. فعلى سبيل المثال، يقوم أويلر، في دراسة الحركة المحنية الأضلاع، بتقسيم كل القوى إلى قوى عادية وقوى تماسّية. وحقق كولين ماك لورين (Colin MacLaurin) تطوراً أساسياً بتقسيم كل القوى وفقاً لثلاثة اتجاهات ثابتة، مما أعطى الحسابات تناظراً ووضوحاً أكبر بكثير. ولكننا نجد أويلر عند كل منعطفات علم الرياضيات الجديد الذي سيستفيد منه علماء الفلك. ويعطي مؤلّفه **مدخل إلى تحليل الصغائر** (*Introductio in analysin infinitorum*) الذي نُشر عام 1748 الصيغ التي تربط الدالات المثالية والأُسّية، والتعبير عن الجيب وجيب التمام بالحاصلات اللامتناهية، وتصنيف القطوع المخروطية وفقاً لمعادلتها، وأسس علم الهندسة التحليلية الثلاثية الأبعاد التي لم يكن ديكارت قد عالجها سوى سطحياً. ثم صدر **مبادئ حساب التفاضل** (*Institutiones calculi differentialis*) في العام 1755 **ومبادئ حساب التكامل** (*Institutiones calculi integralis*) في العام 1768، وهما مؤلَّفان جمع فيهما أويلر كل أعماله وأعمال أسلافه، مُبيِّناً نتائج جديدة كمقارنة طول أقواس الإهليلج بطول أقواس القطع الزائد. وبالتوازي مع هذا التقدم في التحليل الصافي ينمو تطبيقه الأساسي: ألا وهو علم الميكانيك.

2. بيار لويس مورو دو موبرتوي

وُلد موبرتوي (Pierre-Louis Moreau de Maupertuis) (1698 ـ 1759) في سان مالو، وقدِم إلى باريس عام 1714 ليتابع دروساً في الفلسفة كان يلقيها شخص يدعى لو بلون (Le Blond) في معهد دو لا مارش (Collège de la Marche). وعاد إلى بلدته عام 1716 ليفكّر على مهل في اختيار مهنة حياته. وبما أنه قد أظهر دائماً ميلاً شديداً للرياضيات، فقد اختار أن يتابع دروس غيسني (Guisnée) الذي كان مؤلّفه رسالة في **تطبيق الجبر على الهندسة** (*Traité d'application de l'algèbre à la géométrie*) قد أكسبه ترقيته إلى معاون مهندس في أكاديمية العلوم عام 1707. وإذا كان غيسني اليوم مَنسياً ومؤلَّفه غير معروف، فإن الوسط الذي كان ينتمي إليه كان يقع في خضمّ النقاش حول الطرق الجديدة في الهندسة. وفي عام 1696 كان المركيز دو لوبيتال قد نشر مؤلَّفه **تحليل للامتناهيات في الصغر لفهم الخطوط المنحنية** (*Analyse des infiniments petits pour l'intelligence des lignes courbes*) الذي يوفّق فيه بين النتائج المُكتسبة من هندسة ديكارت وأبحاث آل برنولي (Bernoulli) ولايبنتز حول حساب التفاضل. وكان المؤلّف قد أحدث مجادلة في وسط أكاديمية العلوم حيث كان القسّ غالوا (Gallois) قد أعلن اعتراضه على اللامتناهي في الصغر الذي دافع عنه فاريتيون (Varignon)، أستاذ غيسني، بضراوة. إن اختيار الدخول إلى علم الرياضيات من هذه الطريق الجديدة والتي كانت موضوع جدال سيترك أثره في كل أعمال موبرتوي، وسيجعل منه قبل كل شيء أول عالم فرنسي يختار علناً معسكر نيوتن. وسيقوم بذلك في كتاب **حوار حول الأشكال المختلفة للأجرام السماوية** (*Discours sur les différentes figures des astres*) الذي نُشر عام 1732 والذي يكتب فيه: «ولم يكتفِ هويغنز

بذلك: فبعد أن حدد نسبة القوة النافذة تحت خط الاستواء إلى الجاذبية الأرضية، حدد الشكل الذي يجب أن تكون عليه الأرض، ووجد أن قطر خط استوائها يجب أن يكون بالنسبة إلى محوره كما 578 بالنسبة إلى 577. غير أن نيوتن الذي انطلق من نظرية مختلفة واعتبر أن الجاذبية الأرضية هي أثر التجاذب بين أجزاء المادة، كان قد حدد النسبة بين قطر خط الاستواء والمحور، ووجد أنهما الواحد بالنسبة إلى الآخر كما 230 بالنسبة إلى 229». وإذا أعطى نيوتن تفلطحاً أكبر مرتين من الذي أعطاه هويغنز، فإنه على الأقل موجود على المحور نفسه: إن الأرض مفلطحة كليمونة هندية. وبالمقابل، يعتبر كاسيني (Cassini) ومارالدي (Maraldi) أن الأرض مسننة كالأناناس. ويتابع موبرتوي: «ولا تتطابق أي من هذه القياسات مع القياس الذي أخذه حالياً السيدان كاسيني ومارالدي. وإذا نتج عن أرصادهما، ولربما هي أكثر الأرصاد التي تم القيام بها شهرة، أن الأرض، عوضاً عن أن تكون شبه كرة مفلطحة عند القطبين، هي شبه كرة مستطيلة، وإن بدا هذا الشكل لا يتفق مع قوانين السكونيات...». ولهذا السبب، وبهدف بت هذه المسألة الدقيقة، قررت أكاديمية العلوم عام 1735 إرسال بعثة مؤلفة من لا كوندامين (La Condamine) وغودان (Godin) و«بوغي» (Bouguer)، إلى البيرو لقياس قيمة درجة من خط الزوال عند خط الاستواء، وبعثة أخرى إلى لابونيا للقيام بالقياس نفسه قرب القطب الشمالي. وكان موبرتوي المسؤول عن هذه البعثة الثانية، وهو الذي كان قد أظهر كل الفوائد التي يمكن الحصول عليها بمقارنة درجة خط زوال البيرو ليس فقط مع درجة خط زوال فرنسا وإنما مع درجة خط زوال لابونيا.

لكن موبرتوي يبقى مشهوراً بفضل المبدأ الذي يحمل اسمه.

في 15 نيسان/ أبريل عام 1744، قرأ أمام الأكاديمية الملكية للعلوم(*) بحثاً عنوانه **التوافق بين مختلف قوانين الطبيعة** (*Accord de différentes lois de la nature*). وقد عرض في هذا البحث نظريةً سمّاها مبدأ كمية الفعل الأقل والتي تنطوي، بحسب اعتقاده، على ميزة إظهار حكمة الخالق (وهذا لا يشكل بحد ذاته ضمان فعالية في التطبيق اليومي لعلم الميكانيك!). ولترسيخ هذا المبدأ، أخذ موبرتوي لقياس الفعل حاصل ضرب الكتلة بالسرعة وبالمسافة المقطوعة: أي m. v. e. ولكن، إذا كان العاملان «كتلة» و«سرعة» يتوافقان مع أحجام محدّدة، فإن الأمر ليس كذلك بالنسبة إلى المسافة، إلاّ إذا حدّدنا الوقت الذي تم فيه قطعها. ولكن عندها يصبح التمييز بين المسافة والسرعة مضللاً. وينتج عن ذلك أن تطبيق هذا المبدأ الذي كان يقوم على فرض أن تكون كمية الفعل هي الأدنى، كان يؤدي إما إلى ضرورة الحد من المسألة المأخوذة بعين الاعتبار، أو إلى ضرورة إضافة مبدأ آخر ضمنياً. كان موبرتوي مدركاً للانتقادات التي كان يمكنه إثارتها، فكتب: «إنني أعرف نفور العديد من علماء الرياضيات من العلل الأخيرة المطبّقة على علم الفيزياء، وحتى أنني أوافقهم إلى حدّ ما، وأعترف أن إدخالها لا يخلو من المخاطر: إن الخطأ الذي وقع فيها أشخاص مثل فيرما (Fermat) لاتّباعهم هذه العلل يبرهن إلى أي مدى استعمالها محفوف بالخطر. ولكن يمكننا القول بأنه ليس المبدأ هو الذي خدعهم، بل إنها السرعة التي حسبوا فيها

(*) تأسست الأكاديمية الملكية للعلوم (Académie royale des sciences) عام 1666 (في عهد لويس الرابع عشر) واتخذت اللوفر مقرّاً لها. وهي مؤسسة تتكوّن من علماء فرنسيين وأجانب، تهدف إلى تشجيع الأبحاث ونشرها، وإلى المساهمة في تطوير وتنمية العلوم ومكافأة العلماء على أعمالهم البارزة ومؤلّفاتهم المهمة. وكانت ترتبط ارتباطاً حيمياً بالمرصد الفلكي الملكي (Observatoire royal) الذي أسس في السنة نفسها والذي كان علماء الأكاديمية يجتمعون فيه ويستعملون أدوات الرصد الموجودة فيه.

المبدأ وهذا ما لم يكن سوى نتائج له». ولقد وُجّه إلى موبرتوي اللوم نفسه على التسرّع، وانتُقد بسبب الغموض الذي كان ينتج عن ذلك. غير أن أعمال موبرتوي حفّزت أعمال أويلر الذي كان يعتقد، كما موبرتوي، أنه يمكننا فهم الظواهر عبر خواتمها كما عبر أسبابها الفعلية، وأنه لو حاولنا فهمها عبر خواتمها، لكان بإمكاننا التكهّن بأنها تُظهر حداً أقصى أو أدنى. وعلى ذلك، لم يكن وارداً بالنسبة إلى أويلر أن يضع في المقام الأول هذا الحد الأقصى أو الأدنى أو تحديد طبيعته عبر ملاحظات ماورائية بل عبر دراسة دقيقة لحلول المسائل الميكانيكية التي يمكن أن تظهر فيها الكمية التي تتمتع بميزة كونها قصوى أو دنيا. وسيبحث أويلر عن الصيغة التي إذا كان تباينها يساوي صفراً أدّت إلى معادلات علم الميكانيك المعروفة. ويُبيّن أويلر، بالنسبة إلى جسم واحد، الصيغة المنشودة على شكل v. ds، إذ ds هو عنصر المسار وv هي السرعة الموافقة. وتكون هذه الصيغة بالنسبة إلى مسار قطعه الجسم فعلياً أقل من أي طريق آخر قريباً جداً منه يبدأ من نقطة البداية نفسها وينتهي عند نقطة النهاية نفسها. ويمكننا إذاً ـ عكسياً لتحديد المسار ـ البحث عن المنحني الذي يجعل v. ds الأدنى. ويُستخدم مبدأ موبرتوي اليوم تحت اسم مبدأ الفعل الأقل ولكن في الصيغة المُحسّنة التي سيعطيها هاملتون (Hamelton).

3. ألكسي كلود كليرو

إن كليرو (Alexis Claude Clairaut) (1713 ـ 1765) هو الولد الثاني من الواحد وعشرين ولداً لأستاذ رياضيات في باريس. في سن الثانية عشرة قرأ أمام أكاديمية العلوم بحثاً عن بضع منحنيات من الدرجة الرابعة. ويبدو أن الأكاديميين قد انبهروا بكليرو الصغير إذ سمحوا له عام 1731 بالانضمام إليهم كمساعد ميكانيكي، وكان

يجب الحصول من أجل ذلك على إعفاءٍ خاص من الملك إذ كان سن العشرين العمر الأدنى المحدد. وعام 1731 كان العام الذي تم فيه ترقية موبرتوي في هذه الأكاديمية نفسها إلى مساعد مهندس. وما لبث أن تعاون موبرتوي مع كليرو، إذ كانت تجمع بينهما نقاط كثيرة، وذهب كليرو مع موبرتوي إلى لابونيا. وكان الموضوع إذاً يتعلّق ببت مسألة شكل الأرض، وهي إحدى المسائل الأولى الأساسية في ما يخص صلاحية نظريات نيوتن والتي أكبّ عليها كليرو في مؤلّفه **نظرية حول شكل الأرض** (*Théorie de la figure de la terre*) الذي نُشر عام 1743. إن قياسات درجة خط الزوال في فرنسا وفي البيرو وفي لابونيا ثم، في العام 1750، في نصف الكرة الأرضية الجنوبي عند رأس الرجاء الصالح على يد القس لاكاي[*] (Lacaille)، سمحت لموبرتوي من أن يستنتج في مؤلّفه **إضافة إلى حساب درجة من خط الزوال** (*Addition à la mesure du degré du méridien*) ما يأتي: «إن نسبة المحور إلى قطر خط الاستواء هو كنسبة 229 إلى 230، وإن للأرض الشكل الذي أعطاه إياها نيوتن، مع أنه جعل أرضه أصغر بقليل إذ انطلق من درجة أصغر. ولا يبدو أن الأرض يمكنها أن تختلف كثيراً عن هذا الشكل».

4. جان لو رون دالامبير

الشخصية الكبيرة الأخرى من هذه الفترة الأولى لعلم الميكانيك السماوي، هي دالامبير (Jean Le Rond d'Alembert). إن دالامبير

(*) قام لاكاي (1713 ـ 1762)، وهو من أهم علماء فلك القرن الثامن عشر، ببناء مرصد فلكي في رأس الرجاء الصالح، حيث قام بعدد كبير من الأرصاد، واكتشف كوكبات جديدة وأطلق عليها أسماء مقتبسة من ميادين العلوم والفنون، ومن بينها كوكبة الفرن (Fornax) وكوكبة البوصلة (Pyxis) وكوكبة قلم النحات (Caelum).

(1717 ـ 1783) هو الابن غير الشرعي للفارس ديتوش (Destouches) والسيدة دو تانسين (Mme de Tencin)، تُرِكَ عند ولادته على عتبات كنيسة سان جان لو رون (Saint-Jean-le-Rond) قرب كاتدرائية نوتردام في باريس (Notre-Dame de Paris) وعُهد به إلى زوجة زَجّاج سيشعر دالامبير دائماً تجاهها بعرفان للجميل. وعلى الرغم من ذلك، قام بدراسات في مدرسة كاتر ناسيون (collège des Quatre-Nations) واستساغ فيها علم الرياضيات. وقرأ أول بحث له أمام الأكاديمية وهو في الثانية والعشرين من عمره، ووضع في سن السادسة والعشرين، في العام 1743، القواعد الرياضية لديناميكية أنظمة نقاط مادية في كتاب سيبقى أهم مؤلف له، وهو: **رسالة في علم الديناميك** (*Traité de dynamique*). وهو يبني في هذا المؤلف علم الديناميك على ثلاثة مبادئ هي: القصور الذاتي والحركة المركبة وتوازن الأجسام. وعند جمع المبدأين الأخيرين، حصل على المبدأ الذي يحمل اسمه والذي عبّر عنه كما يلي: إن قوى القصور الذاتي الداخلية في نظام نقاط مادية تساوي القوى التي تُنتج التسارع وتتعاكس معها. والطريقة التي تَنتج عنه تختزل كل قوانين حركات الأجسام بقوانين توازنها وترد بالنتيجة علم الديناميك إلى علم السكونيات. كان جاك برنولي (Jacques Bernoulli)، في بحثه عن مركز ذبذبة رقاص الساعة مركّب، قد جعل هذا البحث متعلقاً بشروط توازن رافعة. يأخذ دالامبير هذا المبدأ من وجهة نظر عامة، ويعطيه كل البساطة وغزارة المادة التي يحملها ويطبّقها في مسائل مختلفة ومن بينها مسألة صعبة هي مسألة مبادرة الاعتدالين. وفي البحث الذي وضعه في العام 1749 بعنوان **أبحاث حول مبادرة الاعتدالين وترنّح الأرض** (*Recherches sur la précession des équinoxes et sur la nutation de la Terre*)، يضع معادلات حركة الأرض حول مركز ثقلها ويربط بالانتفاخ الاستوائي للأرض النظرية الرياضية لظاهرة المبادرة هذه التي تَنتج عن الجاذبية القمرية الشمسية.

5. مسائل يصعب حلّها

في العام 1743، ألقى كليرو أمام الأكاديمية مقالاً يحمل عنواناً مدهشاً هو: «مدار القمر في نظام السيد نيوتن». وحتى لو لم يكن نيوتن قد طوّر تماماً نظرية القمر لعدم معرفته بعض معطيات حركته وخاصة بسبب الصعوبات الهائلة التي كان يجب تخطيها، وإن كان بالنتيجة من الضروري إعادة النظرية بالتفصيل، فبأي نظام آخر غير نظام نيوتن كان من الممكن القيام بذلك؟ إن لمعادلات الحركات السماوية خاصية أنها تُحَلّ ببساطة شديدة في حالة جسمين متواجهين، ولكن يكفي أن نضيف جسماً ثالثاً لكي يصبح الحل التحليلي مُعقّداً. وإذا أخذنا النظام الشمسي، يجد الميكانيكيون السماويون أنفسهم أمام مسألة بـ N جسم، حيث N عدد أكبر بكثير من 3. يبدو الوضع إذاً ميؤوساً منه. بيد أن بعض الظروف الخاصة تسمح بمعالجة المسألة بالدقة المطلوبة: فإذا كانت المسألة تتعلق بكوكب ما، فإنه يخضع للتأثير الغالب للشمس، وإذا كانت تتعلق بقمر ما، فإنه يخضع للتأثير الغالب لكوكبه الأم، وهذه الظروف تسمح في البداية بمعالجة مسألة جسمين ثم إدخال تأثيرات الأجسام الأخرى، بدءاً من الأكثر حساسيةً، وذلك على شكل اضطرابات بالنسبة إلى القوة الأساسية. ولكن كتل الأجسام الموجودة في حال النظام المؤلّف من الشمس والأرض والقمر كبيرة جداً والمسافات التي تفصل بينها صغيرة جداً، مما يجعل من الصعب استعمال طريقة الاضطرابات.

إن نظرية حركة القمر تظهر صعوبات جمة لدرجة أن بعض الميكانيكيين السماويين ومن بينهم كليرو وأويلر يعتقدون أنه ربما كان ينبغي تعديل قانون الجاذبية الكونية. ومن هنا صيغة عنوان بحث كليرو. إن التسارع القرنيّ لحركة القمر المتوسطة هو الذي امتنع

لأطول مدّة على فطنة علماء الرياضيات. ويعود اكتشاف حقيقة هذا التسارع في العام 1749 إلى «دنثورن» (Dunthorne) الذي، لتحديد الثوابت الضرورية لوضع جداول حركة القمر، استعمل خسوفات رصدت في القرنين العاشر والخامس عشر. إن مقارنة هذه الخسوفات مع ثلاثة خسوفات من التسعة عشر التي ذكرها بطليموس في **المجسطي** كشفت عن اختلاف منتظم بين اللحظات المرصودة واللحظات المحسوبة. وبالنسبة لـدنثورن كل شيء يحدث كما لو أن حركة القمر كانت تتسارع بـ 20″/ (قرن)^2.

في العام 1749، لم تكن نظرية الجاذبية كما كان نيوتن قد عرضها ولا مساهمات كليرو أو أويلر تسمح بتفسير التسارع القرنيّ للقمر. وبدت المسألة ذات أهمية كبيرة لكي تضع أكاديمية العلوم حلّها كمسابقة منذ العام 1762. وسيبقى الموضوع مطروحاً حتى العام 1774 من دون أن يكون هناك أي جواب مقبول، ويجب انتظار العام 1787 لكي يقوم لابلاس (Laplace) بحل مسألة تسارع القمر القرني ولكن ليس بشكل نهائي كما ظنّ.

وهناك مسألة أخرى كان حلّها يرفض الدخول داخل نطاق علم الميكانيك السماوي وهي مسألة حركة أوج القمر. وقد عمل على هذه المسألة كلٌّ من كليرو ودالامبير وأويلر من دون أن يجد أي منهم قيمة تتطابق مع القيمة المرصودة. وقد وجد كليرو مثلاً حركةً لأوج القمر تكون فيها السرعة أقل مرتين من السرعة المرصودة. وقد اقترح عندها تغيير قانون الجاذبية وإضافة حدٍّ إضافيٍّ K'/R^4 إلى الحد K/R^2. كان ربما بإمكان مساهمة هذا الحدّ أن يسمح بإظهار كل التفاوتات في حركة القمر القريب جداً من الارض وذلك من دون التسبب باضطراب في النتائج التي كان قد تمّ وضعها بالنسبة إلى الكواكب الأبعد بكثير. وكذلك دالامبير الذي ضلّلته تقريبات توصّل

إليها بطريقة خاطئة، سيفكّر بأن عليه أن يرفض قانون الجاذبية في صيغته K/R^2. ويصعب علينا اليوم تصديق أن علماء رياضيات مهرة من أمثال كليرو ودالامبير لم يفكروا أن حدوداً غاية في الصغر في معادلة تفاضلية تزداد كثيراً بالتكامل وذلك بسبب هذه المضاعفات الصغيرة التي تصبح قواسم. ومهما يكن الأمر، فإن دالامبير استنتج في حالته أن مركز ثقل القمر ينجذب نحو الأرض تحت تأثير قوة لا تتغير وفقاً لـ K/R^2 بل لـ $K/R^2 + K'/R$. ودون أن يحدد أي ظاهرة فيزيائية تتدخل بالتحديد في حال نظام الأرض ـ القمر، يبدو أنه كان يفكر بقوة ذات طبيعة مغنطيسية. ثم أقرّ كليرو أنه من الأفضل، قبل تغيير قانون نيوتن، إحراز تقدّم في إتقان التحليل، وبالأخص في اختيار التقريبات الضرورية لتطوّر الحسابات. وهذا ما فعله في بحثه الذي يحتوي على الحلّ والذي قدّمه إلى الأكاديمية عام 1749.

II. الشخصيات الكبيرة

1. لاغرانج

إن جوزيف لويس لاغرانج (Joseph-Louis Lagrange) (1736 ـ 1813) من مواليد تورين يتحدر من عائلة فرنسية نسيبة لعائلة ديكارت. كان والد جدّه في خدمة ملك سردينيا. كان والده أمين خزانة الجيوش السردينية، وقد أفلس في مضاربة في البورصة، مما اضطر لاغرانج إلى البحث عن وظيفة فور انتهاء دراسته. وهكذا وجد نفسه يُدرّس الرياضيات في مدرسة المدفعية في تورين وهو لا يكاد يبلغ العشرين من عمره. وأبحاثه الأولى في التحليل تلامس عن قرب المسائل التي تشغل بال علماء الميكانيك السماوية: وهي مسائل متعلّقة بالنهايات الكبرى للدالات وبنهاياتها الصغرى. وفي العامين 1755 و1756، أطلع أويلر الذي كان يعمل على المسائل نفسها، على

أعماله الأولى. وقد تأثر أويلر بتقدّم طريقة لاغرانج وشموليتها، فأحال أبحاث هذا الأخير إلى موبرتوي الذي كان حينها رئيس أكاديمية برلين (Berlin). وتأثّر موبرتوي كذلك بأعمال لاغرانج، ووجد فيه مدافعاً غير مُتوقّع عن مبدأ الفعل الأقل الخاص به، فعرض عليه منصب عالم رياضيات في بروسيا (Prusse) ولكن لاغرانج رفضه. ثم نشر مؤلّفه رسالة في **طريقة جديدة لتحديد الحدود القصوى والدنيا لتكاملات محدّدة** (*Essai d'une nouvelle méthode pour déterminer les maxima et les minima des intégrales définies*) الذي عرضه أويلر على أكاديمية برلين فقُبِل فيها لاغرانج على الفور عضواً مشاركاً.

إن الطرق التي يعرضها في مؤلّفه **علم الميكانيك التحليلي** (*La Mécanique analytique*) الذي نُشر عام 1788 حقّقت تطوّراً هاماً في تناسق التفكير: إذ يحذف لاغرانج فيها كل اعتبار فيزيائي وهندسي ليطبّق طريقة جبرية بحتة، كما يختصر فيها «نظرية هذا العلم وفن حل المسائل المرتبطة به بصيغ عامة بحيث يعطي تفسير بسيط لها كل المعادلات اللازمة لحل كل مسألة». ويفرح لاغرانج بأننا لا نجد «أي رسم في هذا المؤلّف» وذلك لأن الطرق التي يعرضها فيه لا تتطلّب لا رسوم ولا استدلالات هندسية أو ميكانيكية بل فقط عمليات جبرية خاضعة لسير منتظم ومتناسق. وسيقدّم لاغرانج عدداً كبيراً من الإضافات في الطبعة الثانية ومن بينها طريقة تغيير الثوابت الاعتباطية الشهيرة والرائعة التي قدّمها طريقةً عامة لتقريب كل مسائل علم الميكانيك التي يوجد فيها قوى مشوّشة صغيرة بالنسبة إلى القوى الرئيسية.

ينقسم مؤلّف لاغرانج **علم الميكانيك** إلى قسمين كبيرين: علم السكونيات وعلم الديناميك. ويأخذ لاغرانج مبدأ السرعات الافتراضية

نقطة انطلاق في علم السكونيات: إذا كان هناك توازن في نظام ما مُكوّنٍ من العدد الذي نريده من الأجسام أو النقاط التي يشدّ كل واحد منها بعض القوى، وإذا أعطينا هذا النظام حركةً صغيرةً معيّنة تقطع كل نقطة بموجبها مسافة لا متناهية الصغر تعبّر عن سرعتها الافتراضية، فإن مجموع القوى مضروبة كل واحدة منها بالمسافة التي قطعتها النقطة التي تخضع لها وفقاً لاتجاه هذه القوة نفسها، سيكون دائماً مساوياً لصفر، إذا نظرنا للمسافات الصغيرة المقطوعة باتجاه القوى على أنها إيجابية، وللمسافات المقطوعة بالاتجاه المعاكس على أنها سلبية. أما علم الديناميك، فإنه مبني بالكامل على مبدأ دالامبير. وهذا يعني أن لاغرانج يتقيّد بالاستعمال الشائع الذي يردّ علم الديناميك إلى علم السكونيات ويحصل بالنتيجة على صيغ عامة يمكن تطبيقها على كل الحالات.

2. بيار سيمون لابلاس

وُلد لابلاس (Pierre Simon Laplace) (1749 ـ 1827) في بومون أن أوج (Beaumont-en-Auge)، وهي بلدة صغيرة في النورماندي (Normandie) تقع قرب بون ليفاك (Pont-L'Evêque)، في وسط عائلة متواضعة إذ كان والده مزارعاً صغيراً. ومن المحتمل أن الظهور المبكّر لذكائه المتفوّق هو الذي جعله يُقبل في مدرسة بومون (Collège de Beaumont) التي كان يديرها رهبان سان مور (Saint-Maure) البندكتيون. وصل لابلاس إلى باريس وهو لا يكاد يبلغ سن العشرين، وحصل على مساندة دالامبير الذي جعله يُعيّن أستاذ رياضيات في المدرسة الملكية الحربية. وكانت ثقة دالامبير في محلّها، ومنذ ذلك الحين بدأت بالنسبة إلى لابلاس مرحلة مذهلة من النشاط العلمي، فقد قدّم لأكاديمية العلوم خلال بضع سنوات عدداً كبيراً من الأبحاث المهمة.

إن أوّل بحث خصصه لعلم الميكانيك السماوي هو بعنوان **حول مبدأ الجاذبية الكونية وحول متباينات الكواكب التي تتعلق بها** (*Sur Le Principe de la gravitation universelle et sur les inégalités des planètes qui en dépendent*)، وقد قدّمه للأكاديمية في العام 1773 ونشره في العام 1776. وهو عبارة عن بحث طويل وصعب يتناول فيه لابلاس فحص مبدأ الجاذبية الكونية ويناقش فيه الافتراضات الأربعة التي انطلق منها نيوتن. أولاً، تتناسب الجاذبية تناسباً طردياً مع الكتلة وتناسباً عكسياً مع مربّع المسافة. ثم إن القوة الجاذبة لجسم هي حاصل جاذبية كلٍّ من الأجزاء التي تكوّنه. ثم إن هذه القوة تنتشر بلحظة من الجسم الجاذب إلى الجسم الذي يجذبه إليه. وأخيراً، إن هذه القوة تؤثّر بالطريقة نفسها على الأجسام الساكنة وعلى الأجسام المتحركة. ونجد في هذه الأسئلة وفي الأجوبة التي أعطاها لابلاس صدىً لشكوك تنجت عن صعوبة حل بعض مسائل علم الميكانيك السماوي. ويكتب لابلاس في ما يتعلق بالنقطة الأولى ما يأتي: «غالباً ما يُسأل لماذا تنقص الجاذبية بالتناسب مع مربع المسافة. وبما أن مصدر هذه القوة مجهول، فإنه من المستحيل أن نعطي سببها الفيزيائي. ولكن إذا كان مسموحاً أن ننصرف إلى الميتافيزيقيا في مادة لا يمكن أن نُخضعها للتجربة، أفليس من الطبيعي أن نفكّر أن قوانين الطبيعة موجودة بشكل يكون فيه نظام الكون دائماً مماثلاً لنفسه، إذا ما افتراضنا أن كل أبعاده تتزايد وتتناقص بشكل تناسبي»؟ ويتوافق هذا المبدأ مع الهندسة الإقليدية في فيزياء نيوتن: إن اختيار وحدة الطول في هذا المجال اعتباطية، والعلاقات القياسية مستقلّة عن حجم الأشكال. ويبسط لابلاس تلقائياً هذه الثباتية على القوانين الفيزيائية، وهو لا يطبّق في هذه الحالة سوى مبدأ غاليليه الخاص بالنسبية. أما بالنسبة إلى النقطة الثانية، فيُظهر لابلاس أن العديد من الظواهر التي لاتزال غير

معروفة بشكل جيد تترك مجالاً لبعض الشك، مع أن بحث دالامبير حول مبادرة الإعتدالين وترنّح محور الأرض يبدو وكأنه يؤكد وجهات نظر نيوتن. والشك واضح بالنسبة إلى النقطة الثالثة، رغم أنه يبدو للابلاس أنه من غير المحتمل أن تتمكن المزيّة الجاذبة للأجسام من الانتقال على الفور، إذ إن كل ما ينتقل عبر الفضاء يبدو لنا وكأنه ينتقل بشكل متعاقب وليس على الفور. ولكن، في هذه الحالة الخاصة، إن عدم معرفتنا لطبيعة الجاذبية لا يسمح لنا أن نجزم بذلك. أما بالنسبة إلى السؤال الأخير، فيلاحظ لابلاس أن الافتراض العادي الذي تؤثّر الجاذبية بموجبه بالطريقة نفسها على الأجسام الساكنة وعلى الأجسام المتحركة يعني اعتبار سرعة انتقال الجاذبية لامتناهية. ويستخلص لابلاس بقوله: «سأعتبرها غير محددة وسأحاول أن أحددها بالرصد». وهذا يعني أن الشكّ بالنسبة إلى الافتراض الثالث ينعكس على الافتراض الرابع.

وهناك بحث آخر يُبيّن مشاغل لابلاس منذ العام 1773 وعنوانه **رسالة حول الميل المتوسط لمدارات المذنبات وحول شكل الأرض وحول الدالآت** (*Mémoire sur l'inclinaison moyenne des orbites des comètes, sur la figure de la Terre et sur les fonctions*). ويعالج لابلاس كذلك مسألة شكل الأرض في ملحق لـ **أبحاث حول حساب التكامل ونظام العالم** (*Recherches sur le calcul intégral et le système du monde*) نُشر عام 1772. وفي مؤلفه الكبير **أبحاث حول عدة نقاط من نظام العالم**، (*Recherches sur plusieurs points du système du monde*) (في العامين 1775 و1776) الذي يعمم فيه أبحاثه السابقة، يقترح لابلاس أن يعالج ما يأتي: قانون الجاذبية على سطح مجسّم كروي متجانس في توازن، وظاهرة مد البحر وجزره، ومبادرة الاعتدالين وترنّح محور الأرض اللذين ينتُجان عن هذه الظاهرة،

وتذبذبات الجو التي تحدثها تأثيرات الشمس والقمر. ومن الاهتمام بالتوازن إلى الاهتمام بالثبات لا يوجد سوى خطوة واحدة، وسيكرّس لابلاس عدداً كبيراً من أعماله لشروط الثبات في الأنظمة السماوية. ومن تحليل هذه الأبحاث الأولى التي تحتوي على دراسة المسائل التي ستشغل فكر لابلاس طوال حياته، يمكننا أن نستخلص بترتيب تصاعدي للطموح، كما فعل مرلو بونتي (J. Merleau-Ponty)، الأهداف التي كان لابلاس قد حددها بنفسه منذ العام 1771. ونجد في البداية هدف جعل الأرصاد الفلكية الدائمة التطوّر تتلاءم بدقة شديدة مع نتائج الاستنتاجات الممكنة في نظرية نيوتن وذلك لكي تكون مقنعة بشكل قاطع، مما كان يستتبع أن على تطورات الأرصاد أن تتناسب مع تطورات التحليل. أما بالنسبة إلى هذا الهدف، فإن الضراوة التي وضعها لابلاس في برهنة التسارع القرني للقمر فقط بقوانين علم الميكانيك النيوتنية هي ضراوة نموذجية. وحيث كان كلٌّ من دالامبير وكليرو قد فشلا، وحيث سيفشل لاغرانج كذلك، سينجح لابلاس، وفي 19 كانون الأول/ ديسمبر عام 1787 قدّم الحل أمام أكاديمية العلوم. ويُذكّر في الجزء الخامس من كتابه **علم الميكانيك السماوي** (*La Mécanique céleste*) مراحل تكوُّن اكتشافه بقوله: «عندما اشتغلت بنظرية أقمار المشتري، وجدت أن التباين القرني لانحراف مدار المشتري كان يجب أن يُبرز معادلات قرنية في حركاتها المتوسطة. فسارعت إلى نقل هذه النتيجة إلى القمر...». وكان قد أدخل عندها في نظريته حول حركة الأرض تبايناً ذا دور طويل لانحراف المدار الأرضي، وأظهر بالنتيجة تسارعاً في الحركة برتبة 20"/ (قرن)^2. وهذا التوافق التام بين القيمة التي حدّدها دنثورن وحسابات لابلاس الأولى أعفى هذا الأخير من فحص دقيق لطريقته الحسابية. وستظهر تتمّة القصة أن السبب الميكانيكي الذي اكتشفه لابلاس إذا كان صحيحاً جوهرياً فإن هذا التوافق التام

لم يكن ينتج سوى عن خطأ مبدئي في الحسابات! وفي حين أن آري (Airy) الذي عمل على الوقائع القديمة لأرصاد كسوفات الشمس كان يقترح زيادة قيمة التسارع القرني إلى 24"/ (قرن)^2، كان «جون كاوتش آدمز» (John Couch Adams) يؤكد حساباً تم تأديته بشكل صحيح يؤدي إلى ردّ هذه القيمة إلى 12"/ (قرن)^2. وبعد بضع مجادلات، حوالى العام 1860، كانت القضية قد سُمعت، وكان الحساب يعطي 12" بالفعل والأرصاد 24"، وأطلق هذا الاختلاف بين النظرية والأرصاد البحث مجدداً. كان يجب اكتشاف أن هذا الاختلاف ينتج عن سبب كان لابلاس قد فكر به للحظة وهو: عدم اكتمال دوران الأرض.

لنعد إلى الأهداف التي كان لابلاس قد حددها. في المقام الثاني، كان يجب تقليص التفاوت بين قوانين الحركة وقانون الجاذبية، مما كان يعني من جهة دعم الأسس الفلسفية والتجريبية لنظرية الجاذبية، ومن جهة أخرى تثبيت شموليّتها عبر برهنة أنها تطبّق على حركات الأجرام السماوية كما على أشكالها، وعلى الحركات السماوية كما على الحركات الأرضية. وهذان الهدفان الأوّلان للابلاس لم يكونا يبتعدان في أي شيء عمّا كان يعتقده نيوتن نفسه، ولكن الهدفين الأخيرين هما ليس فقط أكثر طموحاً بل يتناقضان مع فلسفة نيوتن. ويقتضي الهدفان الأخيران إظهار أن ثبات الأنظمة الكونية المرصودة يمكن تفسيره والتكهن به بواسطة نظرية نيوتن، واقتراح أن القوانين التي تحافظ على الترتيب هي كذلك قادرة على خلقه، في حين أن نيوتن كان يعتقد أن نظام العالم كان غير ثابت لدرجة أن الله كان عليه أن يتدخّل على فترات زمنية متباعدة جداً ولكن محتّمة ومنتظمة، وأن جاذبية غير قادرة على الحفاظ على نظام العالم لم يكن بإمكانها بالأحرى تفسير نشأته. وستكمن عظمة لابلاس في تحقيق مشروع شبابه، فكتابه العظيم **علم الميكانيك**

السماوي سيحقق، أو بالأحرى سيعطي الوسائل لتحقيق الأهداف الثلاثة الأولى، وسيعطي كتابه **عرض لنظام العالم** (*Exposition du système du monde*) إمكانية تحقيق الهدف الأخير.

3. وليام هيرشل

في العام 1773، قام وليام هيرشل (William Herschel) (1738 ـ 1822) الذي كان وقتها موسيقياً باستئجار تلسكوب، وحاول أن يركب تلسكوباً آخر له انطلاقاً من أجزاء مختلفة، ثم في نهاية العام نفسه بدأ بصقل مراياه الخاصة. ولن يكف طوال حياته عن صنع تلسكوبات يزداد حجمها مرة بعد مرة. وفي العام 1778، حدد هيرشل هدفاً له إحصاء النجوم الثنائية فصنع تلسكوباً ذا حجم صغير نسبياً: إذ لم يكن قطر مرآته يساوي سوى 17 سم ومسافته البؤرية 2,30 م. غير أنه خلال هذا الكشف المنظَّم الأول للسماء الذي قام به في 13 آذار/ مارس من العام 1781، لاحظ في كوكبة الجوزاء صورة جرم سماوي ذا هيئة ولمعان حيّرت عينه المتمرّسة. وعندما جهّز تلسكوبه بعينيّة أقوى، وجد أن هذا الجرم يُبدي حينها، وعلى عكس النجوم، قطراً ظاهرياً. وعلى الرغم من أن هذا الجرم لم يكن لديه ذؤابة ولا ذيل، فإن هيرشل اعتقد بأنه مذنّب. ولكن كلّما مرّ الوقت قلّ التشابه بين حركة هذا الجرم الجديد وحركات المذنّبات. عندها أثبت لابلاس وليكسيل (Lexel) أن مداره هو مدار كوكب يدور وراء مدار زحل. وسيُسمى أورانوس بناءً على اقتراح بود (J. Bode). إنه المجد بالنسبة إلى هيرشل: لقد منحته الجمعية الملكية وسام كوبلي[*] (Copley Medal)، وفي شهر أيار/ مايو من العام 1782

(*) وسام كوبلي هو جائزة علمية تمنحها الجمعية الملكية (في إنجلترا) لأفضل إنجاز في العلوم الفيزيائية وعلوم الأحياء. تأسّست هذه الجائزة عام 1701 بفضل هبة للجمعية =

استقبله جورج الثالث (George III) الذي منحه معاشاً سنوياً قدره 200 جنيه يرافقه التزام واحد هو أن يعرض السماوات من وقت لآخر على العائلة الملكية، إذ إن هيرشل سيسكن منذ ذلك الحين بالقرب من قصر ويندسور (Windsor).

وعلى الرغم من أن المعاش الملكي كان بالكاد كافياً، حتى ولو أُضيف إليه الـ 50 جنيهاً المخصصة لأخته كارولين (Caroline) التي أصبحت مساعدته، قرر هيرشل التخلي عن الموسيقى وتكريس نفسه لعلم الفلك وبشكل خاص لبنية السماوات. غير أن فهم بنية السماوات يتطلّب في البداية معرفة توزيع الأجرام السماوية ليس فقط وفقاً للاتجاه، بحسب تقاليد علم الفلك القديم، ولكن في الفضاء، إذ إن هيرشل لم يكن يهتم بالنجوم الثنائية على أنها مخلوقات فريدة من السماوات، بل كان ينتظر منها أن تسمح له بتحديد المسافات النجمية. كانت الفكرة بسيطة وساحرة: لإزالة أسباب الخطأ التي كانت تؤثر في الطرق الأخرى، اقترح هيرشل اختيار النجوم الثنائية التي يكون أحد مركَّبيها أضعف بكثير من الآخر، إذ إن انتقال اختلاف منظر النجم الأبعد لا يعني شيئاً بالنسبة لانتقال اختلاف منظر النجم الأقرب. وكان هذا المشروع يتطلّب فرضيتين، **أولاً** أن لا تكون ظاهرة ازدواج النجم ناتجة عن صدفة تراصفات في الفضاء، **وثانياً** أن يكون لكل النجوم الإضاءة الباطنية نفسها، فالاختلاف في اللمعان الظاهر ليس سوى نتيجة لتأثير المسافة. ولسوء حظ هيرشل اتضح أن أياً من هاتين الفرضيتين لم تكن صحيحة. وبالنسبة إلى الفرضية الأولى، كان لدى هيرشل

---

* الملكية من السير غودفري كوبلي (Sir Godfrey Copley) مقدارها 100 جنيه استرليني، وقُدِّم الوسام لأول مرة في العام 1731. ومن علماء الفلك الذين نالوا هذه الجائزة في ذلك العصر جيمس برادلي (James Bradley) وجون كاوتش آدمز.

نوع من الشك منذ بداية إحصائه، ففي العام 1767 كان جون ميشال (John Michell) قد أظهر، في بحث كان هيرشل يعرفه، أنه لمّا كان عدد النجوم الثنائية المعروفة في السماء يتعدى العدد المتوقّع في حساب احتمالات التراصفات العَرَضية فإن بعض هذه النجوم يجب أن تكون ثنائية حقيقية. أما الفرضية الثانية، فإن عدم اعتمادها كان سيؤدّي إلى إبطال المشروع نفسه: وكان هويغنز ـ قبل ذلك ـ قد حاول من دون جدوى أن يحدد المسافة بين نجوم بمقارنة قدرها الظاهر بقدر الشمس الظاهر، ولن يضع هابل(*) (Hubble)، في بداية عصرنا، فرضية مختلفة لأولى أسباره لأعماق خارج المجرّة.

لقد أعلن هيرشل مشروعه هذا في العام 1781 في بحث عنوانه **حول اختلاف منظر النجوم الثابتة** (*On The Parallax Of The Fixed Stars*)، وقدّم في كانون الثاني/ يناير عام 1782 أول جدول له للنجوم الثنائية الذي يتضمن 269 نجماً ثنائياً من بينها 227 رصدها حديثاً. وسيرى جون ميشال في ذلك تأكيداً على وجود نظام نجمين يدور الواحد حول الآخر. وبالفعل، استنتج هيرشل في العام 1802 وبعد أن رصد من جديد بعضاً من النجوم الثنائية الموجودة في جدول عام 1782، أنه يمكن في معظم الحالات إظهار حركة دوران أحد النجمين حول الآخر. وبهذا الإثبات تصبح طريقته في قياس المسافات النجمية بالية. وعلى الرغم من ذلك استمر في العمل على

(*) إدوين باول هابل (Edwin Powell Hubble) (1889 ـ 1853): هو عالم فلك أمريكي اكتشف النجوم القيفاوية، واستطاع بذلك إثبات وجود مجرات أخرى غير مجرة درب التبّانة. وضع نظاماً للترتيب التشكّلي للمجرات وهو ذا قواعد فيزيائية فلكية، وأثبت أن المجرات تبتعد عن بعضها البعض بسرعة تتناسب مع بُعدها عن الأرض، ووضع بالتالي قانون هابل الذي ساهم في نجاح نظرية البيغ بانغ (Bing Bang).

الوصول إلى هدفه الأساسي وأكمل أول جدول له في العام 1785 والعام 1821.

وفي العام 1783، امتلك هيرشل أشهر تلسكوب عنده، وكان يبلغ قطره 47,5 سم ومسافته البؤرية 6,1 م. وبواسطة هذه الآلة سيبدأ بإحصاء السُدُم. وفي ذلك العصر كان يُطلق اسم السُدُم على كل الأجرام ذات الهيئة المبهمة التي كان قد بدأ اكتشافها بعدد كبير بين النجوم النقطية. وكان شارل مسييه (Charles Messier) قد نشر في العام 1781 أول جدول للسدم: وكان قد أُحصي فيه 103 أجرام. وكانت مسألة طبيعة هذه الأجرام السماوية في جدول الأعمال: فهل كل السدم عبارة عن أنظمة نجوم واسعة، أو أن بعضها ليس سحابات غاز مضيء حقيقية؟ وهل السدم موجودة داخل مجرة درب التبانة أو أنها بعيدة عنها نوعاً ما؟

لقد كان هيرشل يعرف تمام المعرفة أن قوة ونوعية أدواته تمكنانه من «التكلّم بثقة أكبر عن البنية الداخلية للسماء ولمختلف طبقاتها السديمية والنجمية». ومن أجل ذلك يجب رصد السماء «كما ينظر عالم الطبيعة إلى مساحة غنية من الأرض أو إلى سلسلة جبال، تتضمن طبقات ذات انحناءات واتجاهات مختلفة ومكوّنة كذلك من مواد مختلفة جداً». لمّا كان هيرشل يتقبّل وجهة نظر كَنْت (Kant) الذي كان يعتقد أن كل السدم هي عبارة عن دروب تبانة بعيدة جداً، فإنه ينوّع وجهة النظر النظامية هذه، ويبدأ بإحصاء السدم وتصنيفها ودراسة تركيبة مجرّتنا بالتفصيل في آن واحد. وسينشر في وقت قصير بحثين مهمين وجدولاً وهما: في العام 1784 **عرض لبعض الأرصاد التي تهتم باستقصاء السماوات** (*Account of Some Observations Tending to Investigate of The Heavens*)، وفي العام 1785 مؤلّفه الشهير **في بنية السماوات** (*on The Construction of The Heavens*)،

وأخيراً في العام 1789 **جدول الألف الثانية من السدم الجديدة والحشود النجمية** (*Catalogue of a Second Thousand of New Nebulae and Clusters of Stars*). إن التمييز بين السدم وسحابات النجوم يدلّ جيداً على أن هيرشل لا يعتبر بالضرورة أن كل الأشياء المبهمة التي يرصدها هي تجمُّعات نجمية. وخلال عشرين سنة من المسح النظامي للسماوات، بين العامين 1783 و1802، سيقوم هيرشل برفع عدد السدم المرصودة من 103 إلى 2500. وسيكون أوّل من يحدد التركيبة المسطّحة لمجرّة درب التبانة، التي استشعرها توماس رايت(*) (Thomas Wright) منذ العام 1750، وسيكون أوّل من يلاحظ وجود عدة أنواع من السدم، وأن بعضها، التي يصفها بالمرقّطة، من الممكن أن تُحدّ بكونها نجوماً. غير أن المسألة لن تتّضح فعلاً إلاّ في العام 1845، أي ثلاثة وعشرين عاماً بعد وفاة هيرشل، عندما سيقوم أحد النبلاء الإرلنديين وهو وليام بارسونز (William Parsons)، ثالث كونت لروس (Rosse)، بتحديد مجرة كلاب الصيد الحلزونية على أنها مجموعة نجوم.

أمّا في ما يتعلق بمجرّتنا، فإن طبيعتها كانت لاتزال في العام 1783 تطرح بعض المسائل. ويُعبّر لالاند (Lalande) في مؤلّفه **علم الفلك** (*Astronomie*) الذي نُشر عام 1771 عن شكوك حول أسباب هيئتها اللبنية: «إن درب التبّانة هي بياض غير منتظم يبدو وكأنه يقوم بدورة حول السماء على شكل حزام. [...] لقد ظنّ ديموقريطس (Démocrite) في ما مضى أن بياض هذا الأثر السماوي يجب أن

(*) توماس رايت (1711 ـ 1786) هو عالم فلك بريطاني اشتهر بفضل مؤلّفه **نظرية مُبتكرة أو فرضية جديدة حول الكون** (*An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*) الذي يُفسّر فيه أن الهيئة اللبنيّة لمجرة درب التبّانة تعود إلى تأثير بصري سببه انغمار الأرض في طبقة مسطّحة من النجوم الخافتة اللمعان.

يكون ناتجاً عن حشد من نجوم صغيرة جداً، بحيث لا تُرى كل واحدة منها على حدة [...] وإذا كان ذلك ممكناً، يجب على الأقل الإقرار بأنه لا يمكن برهنته، إذ إننا نرى بواسطة التلسكوبات نجوماً في كافة أنحاء السماء، تقريباً كما نراها في درب التبّانة أو في السدم. ولا يمكننا أن نشك بأن جزءاً من لمعان درب التبّانة وبياضها لا يأتي من ضوء النجوم الصغيرة الموجودة بالملايين في المجرّة. غير أننا، وبواسطة أكبر التلسكوبات، لا نميّز عدداً كافياً منها، وهي ليست قريبة من بعضها البعض كفاية لكي تنسب إلى تلك التي نميّزها بياض درب التبّانة الذي يمكننا أن نراه بالعين المجرّدة»، ولكن بالنسبة إلى هيرشل، لا يوجد أي شك، فهيئة درب التبّانة، مهما ظن لالاند، لا ينتج إلاّ عن ملايين النجوم التي تملؤها والتي لا تفصل عيننا في ما بينها.

ولمّا كان هيرشل مقتنعاً بأن تلسكوباته كانت تسمح له برصد النجوم حتى أطراف مجرتنا، تخيّل طريقة، هي طريقة المسابر، وهي وإن كانت ستفشل لكنها تظل نواة الطرق الإحصائية في يومنا هذا. يقسم هيرشل السماء إلى مناطق صغيرة موجودة على ارتفاعات مختلفة من جهتَيّ مسطح مجرة درب التبّانة. وفي كلٍّ من هذه المناطق، أحصى عدد النجوم من كل قدر. والنتيجة هي أن مجرّتنا لها شكل بيضوي مسطح ذو أطراف غير منتظمة. إضافة إلى ذلك، يعتقد هيرشل أنه أبصر في مجرة درب التبانة غصنين تقع عقدة تشعبهما في المنطقة التي تلتقي فيها مجرة ذات الكرسي ومجرة قيفاوس. ولا يقع نظامنا الشمسي بعيداً عن هذه العقدة. ولسوء الحظ، كانت هذه الطريقة باطلة للسبب نفسه الذي أبطل طريقة تحديد المسافات بواسطة النجوم الثنائية الخاطئة: فهي كانت تفترض أن الضوء الظاهر للنجوم لا يتعلق سوى بمسافاتها.

إن الهدف الذي كان هيرشل يسعى وراءه عبر تأليفه لجداول السدم والنجوم لم يكن وضع إحصاء شامل أكثر مما كان هذا هدفه في حالة النجوم الثنائية، بل كان إيجاد بنية الكون. ويقول ذلك بشكل واضح في بداية بحثه للعام 1785، وهو سيتفادى طوال عمله صعوبتين متعاكستين، أولهما الاستسلام لـ «مخيلة نزوية وبناء عوالم على طريقتنا، مثل ديكارت ودواماته»، وثانياً «إطلاق العنان للإحصاء من أجل الإحصاء وإضافة أرصاد فوق أرصاد من دون استنتاج أي خلاصات عن بنية السماوات». ويستخدم هيرشل في آب/ أغسطس عام 1789 تلسكوباً عملاقاً جديداً، يبلغ قطر مرآته 1,20 م. ومسافته البؤرية 12 م. ويظن هيرشل أنه بواسطة هذا العملاق سيتمكن ليس فقط من متابعة دراسته لبنية السماوات بل أيضاً سيتمكن من إدراك تطورها. فقد ظل هيرشل مقتنعاً، على الأقل حتى العام 1789، أن الكون بسيط في بنيته وتطوره. ويبدو أن السدم، هذه الأنظمة النجمية الكبيرة ذات الشكل غير المنتظم في البداية، تميل في وقت لاحق نحو الشكل الدائري، أكان ذلك تحت التأثير الوحيد للجاذبية أو تحت تأثير قوىً انضافت إلى الجاذبية، ثم تتكثف مع مرور الوقت، بحيث أن درجة التكثف بالنسبة إلى نوع معين من السدم كان يمكنه أن يصبح مؤشراً لعمرها. وكانت بعض السدم التي تحيط بمركزها الكثير اللمعان هالة خفيفة ومضيئة ستمثل المرحلة النهائية لحشد قديم في طور التفكك. غير أن اكتشاف سديم من نوع جديد يتكون من نجم مركزي محاط بهالة رقيقة جداً لكي تكون مكوّنة من نجوم، في 13 تشرين الثاني/ نوفمبر عام 1790، سيقلب هذا الرسم المبسّط: وكان هذا السديم هو عبارة عمّا سيسمّى بالسدم الكوكبية، وذلك بسبب تشابه تلسكوبي غامض مع صور الكواكب، وهي في الحقيقة بقايا مستعر.

وستنقضي إحدى عشرة سنة قبل أن ينشر هيرشل أول بحث من أبحاثه الأربعة الكبيرة المخصصة لعلم الكون. يعرض أول بحث 33 شكلاً من السدم التي رصدها ويصنّفها، وذلك ليظهر كيف أن الأشكال تترابط مع بعضها البعض، مبرزاً أن حتى النوعين الكبيرين المتعاكسين من الأجرام السماوية، الأجرام ذات الهيئة النقطية والسدم ذات الهيئة المبهمة، تنطوي على بعض الترابط. ويسير هيرشل بثقة في طريق تبيان بنية السماوات. ويُقدّم البحثُ الثاني في العام 1814 الجزء النجمي من السماوات، ولكن دائماً مع الهدف نفسه: ألا وهو إظهار أن هذين الشكلين الأقصويين من الترتيب الكوني يمكن أن يتحول واحدهما إلى الآخر. ولم يبدُ هيرشل بمثل هذه الثقة من قبل، إذ يكتب أن هذا العمل يمهّد الطريق للبحث النهائي حول التنظيم الكوني لكل الأجرام السماوية في الفضاء، ولكن ليكون الأمر كذلك، يجب الانتهاء من سبر أعماق السماء: ومرة أخرى يعيد هيرشل البالغ من العمر ستاً وسبعين سنة استعمال طريقة المسابر الخاصة به. ويُقدّم بحث العام 1817 نتائج أسباره الجديدة ويستأنف كل مسائل تحديد المسافات. وبما أن طريقة اختلاف المناظر قد فشلت، فإن الدقة القصوى لأرصاد هيرشل كانت أعلى من الثانية القوسية، وكان يجب أن تكون برتبة نصف ثانية، فاكتفى بتحديد المسافات النسبية: لن نعرف العالم إلاّ بتشابه الوضع تقريباً. بالإضافة إلى ذلك، وبما أنه اتضح أن مُسلّمة العلاقة البسيطة بين الأقدار والمسافات هي خاطئة، يجب الاكتفاء برصد القدر الظاهر واتخاذ نموذج لتوزيع النجوم في الكون، فاختار توزيعاً متجانساً، أي أن عدد النجوم يتزايد كمكعب شعاع الطبقة المرصودة. ويُقدّم هيرشل بحثه الأخير في العام 1818 وهو مخصص لتعداد السدم على مسافات متزايدة باستمرار. غير أن عنوان هذا البحث يكشف عن الشعور بالفشل الذي أنهى به هيرشل حياته المهنية: **أرصاد فلكية لإثبات**

المسافة النسبية لحشد نجمي وقدرة التلسكوبات على الوصول إلى الفضاء (*Astronomical Observations For Ascertaining The Relative Distance of Cluster of Stars and The Power of Telescopes to Reach Into Space*). لقد تزعزعت ثقته التامة بتلسكوباته التي كان يجب أن تقوده إلى نهاية الكون: إذ يوجد أجرام مبهمة لا يستطيع هيرشل تحديد طبيعتها، والأسوأ من ذلك أنه من المرجّح أن تلسكوباً أقوى من أقوى تلسكوباته، إذا كان سيحل غموض جرم، فإنه سيكشف عدداً أكبر من الأجرام الغامضة الجديدة. ومن الممكن أن يكون هذا البحث محكوماً عليه بالفشل.

III. انتصار علم الميكانيك السماوي

لقد تم إذاً اكتشاف كوكب أورانوس في العام 1781. وقد لوحظ حينها أنه تم رصد هذا الكوكب على أنه نجم ثابت قبل أن يكتشف هيرشل أنه عبارة عن كوكب سيّار. وكان الأمر بمثابة حظ غير منتظر. فمنذ العام 1820، كان في المتناول نتائج أربعين سنة من الرصد، يضاف إليها نحو عشرين رصداً لعبور الكوكب عند خط الزوال، تمّت بين العامين 1690 و1771 على يد فلامستيد (Flamsteed) وبرادلي (Bradley) وماير (Meyer) ولو مونييه (Le Monnier). وفي العام 1821، عكف ألكسي بوفار (Alexis Bouvard)، وهو مساعد قديم للابلاس، على إعادة حساب جداول حركات المشتري وزحل وعلى حساب جداول حركات القادم الجديد إلى عالم الكواكب. ولكن أورانوس كان يقاوم، فالفارق بين الجداول والأرصاد كان يصل إلى دقيقة ونصف. وابتداءً من العام 1835، قام آري وأراغو (Arago) وبيسيل (Bessel) وجون هيرشل (John Herschel) (ابن وليام) ثم أوجين بوفار (Eugène Bouvard) (ابن أخ ألكسي) بالتشاور في ما بينهم حول هذه المسألة، وصاغوا فرضية أن هذه الفوارق يمكن أن

يكون سببها كوكبٌ مشوّش وراء أورانوس. وفي العام 1845، كانت الفوارق قد بلغت دقيقتين، فانصرف لو فيرييه (Le Verrier) عندها إلى البحث عن الكوكب المُشوّش. وابتداءً من 10 تشرين الثاني/ نوفمبر عام 1845، كان بإمكان لو فيرييه أن يُقدّم أمام أكاديمية العلوم بحثه **الرسالة الأولى حول نظرية أورانوس** (*Premier mémoire sur la théorie d'Uranus*). وسيتبعه في الأول من حزيران/ يونيو عام 1846 بحث آخر عنوانه: **أبحاث حول حركات أورانوس** (*Recherches sur les mouvements d'Uranus*). وأخيراً صدر النص النهائي والحاسم في 31 آب/ أغسطس، وعنوانه: **حول الكوكب الذي كان يحدث الاضطرابات المرصودة في حركة أورانوس. تحديد كتلته ومداره وموقعه الحالي** (*Sur la planète qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uramus. Détermination de sa masse, de son orbite et de sa position actuelle*). وكان يجب إيجاد الكوكب المشوّش. واختار لو فيرييه أن يتوجّه إلى جوهان غال (Johann Galle)، عالم فلك مرصد برلين. وقد كتب له رسالة في 18 أيلول/ سبتمبر عام 1846. وصلت الرسالة في 23 أيلول/ سبتمبر، وفي المساء نفسه وجّه غال ومساعده هنري داريست (Henri d'Arrest) منظاراً ذا فتحة من 23 سم نحو المنطقة المُشار إليها، أي كوكبة الجدي: ولم يكن هناك أي جرم ذي قطر ظاهر. واقترح داريست عندها مقارنة المنطقة ذلك المساء مع خارطة المنطقة نفسها قبل العام 1845، وهو تاريخ طباعة **أطلس النجوم** (*Star Atlas*) الذي وضعه كارل بريميكر (Carl Bremiker): على بعد 52′ من الموقع الذي حدده لو فيرييه كان هناك جرم سماوي لم يكن موجوداً قبل بضع سنوات.

من المعروف أنه كان للو فيرييه منافس سيئ الحظ ودون علمٍ

منه. في العام 1843، أي قبل عامين من حسابات لو فيرييه الأولى، كان جون كاوتش آدمز، وهو شاب في الثانية والعشرين من عمره من جامعة كامبردج (Cambridge)، قد انكبّ على العمل نفسه. وكان قد وضع فرضيات لو فيرييه نفسها، أي أن الكوكب المجهول كان في مستوي دائرة البروج نظراً إلى أن شذوذ حركة أورانوس كانت لا أهمية لها على خطوط العرض، وأنه وفقاً للتعديل الخارجي لقاعدة تيتيوس بود(*) (Titius-Bode) يجب أن يكون هذا الكوكب موجوداً على مسافة من الشمس تساوي ضعف مسافة أورانوس. وكان «آدمز» قادراً، بدءاً من أيلول/ سبتمبر عام 1845، على تحديد مكان الكوكب المشوّش في السماء. وكما فعل لو فيرييه بعد سنة من ذلك التاريخ، كتب إلى راصد قادر على تأكيد اكتشافه النظري هو جيمس شاليس (James Challis)، عالم فلك في غرينيتش (Greenwich). ثم عندما لم يجبه هذا الأخير، توجّه آدمز إلى جورج آري (George Airy) الذي كان مدير المرصد حينها، والذي أجابه ولكن لكي يسأله عن توضيح رأى جون آدامز أنه بداهي لدرجة أنه لم يجب عليه. وبهذه الطريقة سُلِب عالم فلك شاب لامع جداً، ولكنه مجهول، اكتشافاً عظيماً على يد ميكانيكي سماوي محنّك.

وبالنسبة إلى اكتشاف نبتون، هناك جدال أكثر أهمية من الجدال الذي أثاره مؤيدو عالمي الفلك، وهو يتعلّق بالحظ الذي تمتّع به لو

(*) إن قاعدة تيتيوس بود، التي غالباً ما يُطلق عليها اسم قاعدة بود، تقوم على مبدأ وجود علاقة تقريبية بين مسافة الكواكب إلى الشمس ورتبتها ضمن النظام الشمسي. وقد وضعها عالم الرياضيات الألماني يوهان تيتيوس (Johann Titius) عام 1766 ونشرها عالم الفلك الألماني يوهان بود (Johann Bode) عام 1772. وجاء اكتشاف كوكب أورانوس عام 1781 ليؤكّد صحة هذه القاعدة، ولكنها لم تنطبق على كوكب نبتون، ويعتبرها بعض علماء الفلك اليوم مجرّد صدفة.

فيرييه. إنه، كما آدمز، كان قد وضع فرضية أن الكوكب الذي يجب إيجاده موجود على مسافة من الشمس أبعد مرتين من أورانوس، أي على مسافة تساوي 38 وحدة فلكية(*). غير أن نبتون موجود على بعد 30,11 وحدة فلكية من الشمس. ومن جهة أخرى، كان لو فيرييه قد حدّد للكوكب المجهول كتلة 32 مرة أكبر من كتلة الأرض. ولكن وليام لاسيل (William Lassel) اكتشف في نهاية العام 1846 قمراً لنبتون، تريتون. مما سمح بقياس وزن نبتون، فاتضح أن كتلته لا تساوي سوى 17 مرة كتلة الأرض. ويتّفق أن الخطأ في تقدير المسافة الذي وقع فيه كلٌ من آدمز ولو فيرييه، يُعوض عنه الخطأ في تقدير الكتلة، ويساهم أيضاً في هذا التعويض المبالغة في تقدير الاختلاف المركزي للمدار!

ومهما كان أمر هذه الحجج الدقيقة التي أثارت بعض الميكانيكيين السماويين، فإن اكتشاف الكوكب الجديد بالحساب يدلّ على انتصار علم الميكانيك النيوتوني. بيد أن الوقت الذي ستصل فيه الطريق الملكية إلى طريق مسدود ليس بعيداً. ولكن ذلك قصة أخرى، القصة التي ستقود إلى انهيار مفاهيم الفضاء المطلق والزمن المطلق اللذين كان علم الميكانيك السماوي يرتكز عليهما منذ ثلاثة قرون. إن علم الفيزياء يتأثر في أسره بذلك، ولكنه سيخرج وهو أشدّ فعالية وقوّة.

(*) وحدة قياس المسافات في الفضاء، وهي تساوي المسافة المتوسطة بين الأرض والشمس، أي 149598600 كلم.



الثبت التعريفي

اتصال (Syzygie): موقع القمر عندما يكون في مقابلة أو في اقتران مع الشمس. انظر «مقابلة» و«اقتران».

اختلاف المنظر (Parallaxe): تغيُّر الموقع الظاهري لجرم سماوي بسبب تغيُّر موقع الراصد.

اعتدال (Equinoxe): أحد الوقتين من السنة اللذين تتسامت فيهما الشمس على خط الاستواء ويتساوى الليل والنهار.

اقتران (Conjonction): لحظة تواجد جرمين سماويين على خط الطول السماوي نفسه، بحيث يبدوان للراصد وكأنهما في موقع واحد.

انقلاب (Solstice): أحد الوقتين من السنة اللذين تصل فيهما الشمس إلى أبعد نقطة في مسارها من خط الاستواء السماوي.

أوج (Apogée): النقطة الأبعد عن الأرض في مدار جسم يدور حولها. ويُقابلها «الحضيض» وهو النقطة الأقرب.

تربيع (Quadrature): موقع جرم سماوي تكون فيه مسافته الزاوية بالنسبة إلى الشمس تساوي 90°.

ترنّح (Nutation): اهتزاز محور دوران الأرض حول موقعه المتوسط.

تقهقر/ تراجع (Rétrogradation): حركة جرم سماوي في مداره يبدو خلالها وكأنه يتحرك بالاتجاه المعاكس لحركته الطبيعية .

الجاذبية الأرضية (Pesanteur): القوى الجاذبة التي يخضع لها جسم ما على مقربة من الأرض والتي تجذبه نحو نواتها المركزية.

حضيض (Périgée): النقطة الأقرب من الأرض في مدار جسم يدور حولها. ويقابلها «الأوج» وهو النقطة الأبعد.

خط زوال (Méridien): دائرة وهمية في الكرة السماوية تمرّ بالقطبين السماويين وبسمت الراصد.

دائرة البروج (Ecliptique): الدائرة السماوية العظمى التي تشكّل المسار السنوي الظاهري للشمس.

زيج (Table astronomique): جداول رياضية عددية، تحدد حركات الكواكب السيارة في فلكها ووضعها من حيث الارتفاع والانخفاض والميول، وهي بالتالي تسمح بحساب أماكن الكواكب السيارة في وقت زمني محدد.

سمت الرأس/ السّمت (Zénith): النقطة في القبة السماوية التي تقع على خط عمودي فوق رأس الرّاصد.

شروق شمسي (Lever héliaque): الوقت الذي يتوافق فيه شروق نجم مع شروق الشمس وذلك بعد فترة زمنية كان فيها هذا النجم غير مرئي فوق الأفق إما لوجوده تحت الأفق أو لأنه مغطى بنور الشمس.

شمس كاذبة (Parhélie): ظاهرة بصرية سببها انكسار أشعة

الشمس على بلّوريات ثلجية موجودة في الجو.

علم الميكانيك السماوي (Mécanique céleste): فرع من علم الفلك يُعنى بدراسة حركات الأجرام السماوية وحساباتها بواسطة النظريات الفيزيائية والرياضية.

فلك البروج (Zodiaque): منطقة في القبة السماوية تقع فيها المدارات الظاهرية لكل من الشمس والقمر وكواكب النظام الشمسي الثمانية.

فلك التدوير (Epicycle): في النظام الأرضي المركز، دائرة يجتازها كوكبٌ ما في دورانه حول الأرض، في حين يجتاز مركزُها دائرةَ أخرى تُسمّى بـ «الفلك الحامل».

فلك حامل (Déférent): في النظام الأرضي المركز، دائرة يقطعها مركز فلك تدوير كوكب ما في دورانه حول الأرض.

قبا (Apside): كل واحدة من النقاط الأربع من مدار جسم سماوي التي تكون الأقرب إلى الجسم الذي يدور حوله أو الأبعد عنه.

قدْر (Magnitude): قياس إضاءة جرم سماوي كما تتراءى للإنسان على الأرض، وهو يقسم النجوم إلى ست مراتب: فتكون النجوم الأكثر سطوعاً من القدر الأول، والتي تليها من القدر الثاني، وهكذا دواليك، حتى القدر السادس الذي يقيس إضاءة النجوم الأكثر خفوتاً التي تراها العين المجرّدة.

كوكب داخلي (Planète intérieure): كوكب مداره أقرب إلى الشمس من مدار الأرض، ككوكبي الزهرة وعطارد.

كوكب علوي (Planète supérieure): كوكب مداره أبعد عن

الشمس من مدار الأرض، ككوكب المريخ وزحل والمشتري.

مبادرة الاعتدالين (Précession des équinoxes): حركة تغيُّر بطيء في اتّجاه محور دوران الأرض تُسبّبها الجاذبية بين الشمس والأرض وبين القمر والأرض.

مقابلة (Opposition): وقوع جرم سماوي على الخط الذي يصل الشمس بالأرض بحيث تكون الأرض بين الشمس والجرم.

نجوم الثريا (Les Pléiades): عنقود نجمي مفتوح يقع في كوكبة الثور فوق كتف الجبّار اليمنى، وهو يُعرف أيضاً باسم «بنات نعش» أو «الشقيقات السبع».

نقطة تساوٍ (Point équant): النقطة التي يدور حولها بسرعة ثابتة مركز فلك تدوير كوكب.

وجه (Décan): كل جزء من الأجزاء الثلاثة التي تقسم إليها كل صورة من صور البروج، علماً بأن كل واحدة من هذه الأجزاء تتكوّن من عشر درجات.

وحدة فلكية (Unité astronomique): وحدة قياس المسافات في الفضاء، وهي تساوي المسافة المتوسطة بين الأرض والشمس، أي 149598600 كلم.

ثبت المصطلحات

فرنسي - عربي

Année sidérale	سنة نجمية
Année tropique	سنة مدارية
Apogée	أوج
Apside	قبا
Céphéide	نجم قيفاوي
Conjonction	اقتران
Constellation	كوكبة
Cycle du Saros	دورة ساروس
Décan	وجه
Déférent	فلك حامل
Distance angulaire	مسافة زاوية
Distance focale	مسافة بؤرية
Distance stellaire	مسافة نجمية
Eclipse de lune	خسوف

Eclipse de soleil	كسوف
Ecliptique	دائرة البروج
Ellipse auxiliaire	إهليلج مساعد
Elongation	تطوّل
Ephéméride	تقويم
Epicycle	فلك التدوير
Equateur	خط الاستواء
Equation du centre	معادلة المركز
Equinoxe de printemps	اعتدال ربيعي
Espace	فضاء
Etoile	نجم
Etoiles doubles	نجوم ثنائية
Evection	تفاوت دوري
Excentricité	انحراف عن المركز
Excentrique	فلك خارج المركز
Fonction	دالّة
Fonction zigzag linéaire	دالّة متعرجة خطيّة
Force centrifuge	قوة نافذة
Force centripète	قوة جاذبة
Galaxie	مجرة
Galaxie spirale	مجرة حلزونية
Géocentrique	أرضي المركز
Géocentrisme	مركزية الأرض
Gravitation universelle	الجاذبية الكونية

Halo	هالة
Héliocentrique	شمسي المركز
Héliocentrisme	مركزية الشمس
Horizon	أفق
Inégalité zodiacale	تفاوت بروجي
Inverse-carré	تربيع عكسي
Latitude	خط العرض
Les Fixes	الثوابت
Lever héliaque	شروق شمسي
Ligne des apsides	خط القبا
Ligne des nœuds	خط العقد
Longitude	خط الطول
Lunette	منظار
Magnitude	قدر
Masse	كتلة
Mécanique céleste	علم الميكانيك السماوي
Méridien	خط زوال
Mois anomalistique	شهر غير قياسي
Mois draconitique	شهر تنيني
Mois lunaire	شهر قمري
Mois synodique	شهر اقتراني
Moment cinétique	عزم الحركيّ
Mouvement céleste	حركة سماوية
Nébuleuse	سديم

Nébuleuse planétaire	سديم كوكبي
Nœud	عقدة
Nova	مستعر
Nutation	ترنّح
Obliquité	ميل
Observation	رصد
Observatoire	مرصد
Opposition	مقابلة
Orbe/ Orbite	مدار
Parallaxe	اختلاف المنظر
Parhélie	شمس كاذبة
Pendule	رقاص الساعة
Périgée	حضيض
Pesanteur	الجاذبية الأرضية
Plan	مستوٍ
Plan de l'équateur	مستوي خط الإستواء
Planète	كوكب
Planète intérieure	كوكب داخلي
Planète supérieure	كوكب علوي
Point équant	نقطة تساوٍ
Points équinoxiaux	النقاط الاعتدالية
Précession des équinoxes	مبادرة الاعتدالين
Principe d'inertie	مبدأ العطالة

Quadrature	تربيع
Rayon vecteur	متجه نصف قطري
Rétrogradation	تقهقر
Révolution sidérale	دوران نجمي
Révolution synodique	دوران اقتراني
Rotation de la Terre	دوران الأرض
Saison	فصل
Satellite	قمر
Seconde d'arc	ثانية قوسية
Séculaire	قرني
Sextant	سدسية
Solstice	انقلاب
Solstice d'été	انقلاب صيفي
Spectroscopie	علم الطيف
Stade	غلوة
Stellaire	نجمي
Système solaire	نظام شمسي
Syzygie	اتصال
Table astronomique	زيج
Tache solaire	كلف شمسي
Télescope	تلسكوب
Trajectoire	مسار
Unité astronomique	وحدة فلكية
Univers	الكون

Vitesse angulaire	سرعة زاوية
Zénith	سمت الرأس
Zodiaque	فلك البروج

* * *

Balance	الميزان
Bélier	الحمل
Capricorne	الجدي
Cassiopée	ذات الكرسي
Céphée	قيفاوس
Ecrevisse	السرطان
Gémeaux	الجوزاء
Jupiter	المشتري
Voie lactée	مجرة درب التبانة
Chiens de chasse	كلاب الصيد
Pléiades	نجوم الثريا
Lion	الأسد
Mars	المريخ
Mercure	عطارد
Neptune	نبتون
Orion	الجبار
Poisson	الحوت
Sagittaire	القوس
Saturne	زحل

Scorpion	العقرب
Spica	السماك الأعزل
Taureau	الثور
Titan	تيتان
Triton	تريتون
Uranus	أورانوس
Vénus	الزهرة
Verseau	الدلو
Vierge	العذراء




مرکز تحقیقات کامپیوتری علوم اسلامی

ثبت المصطلحات

عربي - فرنسي

اتصال — Syzygie

اختلاف المنظر — Parallaxe

أرضي المركز — Géocentrique

اعتدال ربيعي — Equinoxe de printemps

أفق — Horizon

اقتران — Conjonction

انحراف عن المركز — Excentricité

انقلاب — Solstice

انقلاب صيفي — Solstice d'été

إهليلج مساعد — Ellipse auxiliaire

أوج — Apogée

تربيع — Quadrature

تربيع عكسي — Inverse-carré

ترنّح — Nutation

تطوّل — Elongation

Inégalité zodiacale	تفاوت بروجي
Evection	تفاوت دوري
Rétrogradation	تقهقر
Ephéméride	تقويم
Télescope	تلسكوب
Seconde d'arc	ثانية قوسية
Fixes	ثوابت
Pesanteur	الجاذبية الأرضية
Gravitation universelle	الجاذبية الكونية
Mouvement céleste	حركة سماوية
Périgée	حضيض
Eclipse de Lune	خسوف
Equateur	خط الاستواء
Longitude	خط الطول
Latitude	خط العرض
Ligne des nœuds	خط العقد
Méridien	خط زوال
Ligne des absides	خط القبا
Fonction	دالّة
fonction zigzag linéaire	دالّة متعرجة خطيّة
Ecliptique	دائرة البروج
Révolution synodique	دوران اقتراني
Rotation de la terre	دوران الأرض
Révolution sidérale	دوران نجمي
Cycle du Saros	دورة ساروس

Observation	رصد
Pendule	رقاص الساعة
Table astronomique	زيج
Sextant	سدسية
Nébuleuse	سديم
Nébuleuse planétaire	سديم كوكبي
Vitesse angulaire	سرعة زاوية
Zénith	سمت الرأس
Année tropique	سنة مدارية
Année sidérale	سنة نجمية
Lever héliaque	شروق شمسي
Parhélie	شمس كاذبة
Héliocentrique	شمسي المركز
Mois synodique	شهر اقتراني
Mois draconitique	شهر تنيني
Mois anomalistique	شهر غير قياسي
Mois lunaire	شهر قمري
Moment cinétique	عزم الحركي
Nœud	عقدة
Spectroscopie	علم الطيف
Mécanique céleste	علم الميكانيك السماوي
Stade	غلوة
Saison	فصل
Espace	فضاء
Zodiaque	فلك البروج
Epicycle	فلك التدوير

Excentrique	الفلك الخارج المركز
Déférent	فلك حامل
Apside	قبا
Magnitude	قدر
Séculaire	قرني
Satellite	قمر
Force centripète	قوة جاذبة
Force centrifuge	قوة نافذة
Masse	كتلة
Eclipse de Soleil	كسوف
Tache solaire	كلف شمسي
Planète	كوكب
Planète intérieure	كوكب داخلي
Planète supérieure	كوكب علوي
Constellation	كوكبة
Univers	كون
Précession des équinoxes	مبادرة الاعتدالين
Principe d'inertie	مبدأ العطالة
Rayon vecteur	متجه نصف قطري
Galaxie	مجرة
Galaxie spirale	مجرة حلزونية
Orbe/ orbite	مدار
Observatoire	مرصد
Géocentrisme	مركزية الأرض
Héliocentrisme	مركزية الشمس
Trajectoire	مسار

Distance focale	مسافة بؤرية
Distance angulaire	مسافة زاوية
Distance stellaire	مسافة نجمية
Nova	مستعر
Plan	مستوٍ
Plan de l'équateur	مستوي خط الإستواء
Equation du centre	معادلة المركز
Opposition	مقابلة
Lunette	منظار
Obliquité	ميل
Etoile	نجم
Céphéide	نجم قيفاوي
Stellaire	نجمي
Etoiles doubles	نجوم ثنائية
Système solaire	نظام شمسي
Points équinoxiaux	نقاط اعتدالية
Point équant	نقطة تساوٍ
Halo	هالة
Décan	وجه
Unité astronomique	وحدة فلكية

* * *

Lion	الأسد
Uranus	أورانوس
Triton	تريتون
Titan	تيتان

Taureau	الثور
Orion	الجبّار
Capricorne	الجدي
Gémeaux	الجوزاء
Bélier	الحمل
Poisson	الحوت
Verseau	الدلو
Cassiopée	ذات الكرسي
Saturne	زحل
Vénus	الزهرة
Ecrevisse	السرطان
Spica	السماك الأعزل
Vierge	العذراء
Mercure	عطارد
Scorpion	العقرب
Sagittaire	القوس
Céphée	قيفاوس
Chiens de chasse	كلاب الصيد
Voie lactée	مجرة درب التبّانة
Mars	المريخ
Jupiter	المشتري
Balance	الميزان
Neptune	نبتون
Pléiades	نجوم الثريا

المراجع

1 ـ العربية

كتب

بطرس، أنطوان. **العصور العربية لعلم الفلك، ما قبل وما بعد.** بيروت: مكتبة لبنان ناشرون؛ القاهرة: الشركة المصرية العالمية للنشر ـ لونجمان، 2003.

العرضي، مؤيد الدين بن بريك. **تاريخ علم الفلك العربي: كتاب الهيئة.** تحقيق جورج صليبا. بيروت: مركز دراسات الوحدة العربية، 2001.

موسوعة تاريخ العلوم العربية. إشراف رشدي راشد. بيروت: مركز دراسات الوحدة العربية، 1997. 3 أجزاء.

2 ـ الأجنبية

Books

Berry, Arthur. *A Short History of Astronomy from Earliest Times Through the Nineteenth Century.* New York: Dover Publications, 1961.

Dictionnary of Scientific Biography. New York: Scribner, 1970-1990.

Dreyer, John Louis Emil. *A History of Astronomy from Thales to Kepler*. New York: Dover Publications, 1953.

Duhem, Pierre Maurice Marie. *Le Système du monde: Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*. Paris: Hermann, 1913-1959. 10 tomes.

Heath, Thomas Little. *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus*. Oxford: Clarendon Press, 1913.

Hoskin, Michael Anthony. *William Herschel and the Construction of the Heavens*. London: Oldbourne, 1963.

Kepler, Johannes. *Le Secret du monde*. Introduction, traduction et notes de Alain Segonds. Paris: Les Belles lettres, 1984. (Science et humanisme)

King, Henry Charles. *The History of the Telescope*. New York: Dover Publications, 1955.

Koyré, Alexandre. *Du Monde clos à l'univers infini*. Paris: Gallimard, 1973.

———. *La Révolution astronomique: Copernic, Kepler, Borelli*. Paris: Hermann, 1961.

Laffite, Roland. *Des Noms arabes pour les étoiles*. 2e éd. Paris: Geuthner, 2001.

Lebon, Ernest. *Histoire abrégée de l'astronomie*. Paris: Gauthier-Villars, 1899.

Merleau-Ponty, Jacques. *La Science de l'univers* à l'âge du positivisme. Paris: Vrin, 1983.

Michot, Yahya. *Avicenne, réfutation de l'astrologie*. Beyrouth: Al-Bouraq, 2006.

Neugebauer, Otto. *The Exact Sciences in Antiquity*. New York: Dover Publications, 1969.

Tannery, Paul. *Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne*. Paris: Gauthier-Villars, 1893.

Taton. *Histoire générale des sciences*. Paris: Presses universitaires de France, 1966.

Van Helden, Albert. *Measuring the Universe: Cosmic Dimensions*

from Aristardus to Halley. Chicago: University of Chicago Press, 1985.

Verdet, Jean-Pierre. *Une Histoire de l'astronomie*. Paris: Le Seuil, 1990.

Vernet, Juan. *Ce que la culture doit aux arabes d'Espagne*. Traduit de l'espagnol par Gabriel Martinez Gros. Paris: Sindbad, 1985.

Waerden, Bartel L. Van der. *Science Awakening II: The Birth of Astronomy*. New York: Oxford University Press, 1974.

Wilson, Curtis. *Astronomy from Kepler to Newton: Historical Studies*. London: Variorum Reprints, 1989.

Periodical

Edward Stewart, Kennedy. «The Arabic Heritage in the Exact Sciences.» *Al- Abhath*: vol. 23, nos. 1-4, December 1970.




مرکز تحقیقات کامپیوتری علوم اسلامی

الفهرس

ـ ب ـ

ـ ت ـ

ـ ث ـ

ـ غ ـ

ـ ف ـ

ـ ق ـ

ـ ك ـ

ـ ل ـ

ـ م ـ

ـ ن ـ

ـ هـ ـ

